Dr.habil. Ralf E. Krupp
Flachsfeld 5
31303 Burgdorf

Auswirkungen der Grundwasserhaltung im Rheinischen Braunkohlenrevier auf die Topographie und die Grundwasserstände, sowie daraus resultierende Konsequenzen für Bebauung, landwirtschaftliche Flächen, Infrastruktur und Umwelt

Studie im Auftrag der Fraktion Bündnis 90 / Die Grünen im Landtag von Nordrhein-Westfalen.

Burgdorf, 23. 07. 2015

Dr. habil Ralf E. Krupp

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Disclaimer 3

Kurzfassung 4

Einführung und Problemstellung 7
Aktueller Sachstand 7
Zielstellung 8

Geologische Grundlagen 9
Tektonik 10
Zwischenfazit Tektonik 18
Tertiär 19
Quartär 27
Zwischenfazit Stratigraphie 31

Braunkohlenbergbau 32
Tagebau Inden 35
Tagebau Hambach 36
Tagebau Garzweiler 37
Zwischenfazit Braunkohletagebaue 39

Hydrogeologie 40
Hydrostratigraphie 40
Hydrogeologische Teilräume und Tektonik 43
Zwischenfazit Hydrogeologie 44

Wasserhaltung 45
Sümpfung 45
Oberster Grundwasserleiter 47
Tiefe Grundwasserleiter 51
Grundwasserbilanzen 56
Zwischenfazit Grundwasserbilanz 59
Grundwasseranreicherung 60
Flutung der Tagebau-Restlöcher 61
Zwischenfazit Restseen und Grundwasserprognosen 64
Hydrogeologische Modelle 65
Zwischenfazit Grundwassermodelle 71

Bodensenkungen und Hebungen 72
Bodensenkungen über gewachsenem Boden ... 72
Reversible und irreversible Prozesse 73
Braunkohle und Torf 74
Praktische Erfahrungen über sümpfungsbedingte Bodenbewegungen 75
Hinweis auf Bodenbewegungen durch Steinkohlenbergbau 83
Setzungsstufen 86
Gefälleänderungen 88
Zwischenfazit sümpfungsbedingte Bodensenkungen 89
Bodensenkungen über Kippen 91
Zwischenfazit Bodensenkungen über Kippen ... 97

Geochemische Aspekte 98
Pyrit-Oxidation 98
Säure-Base-Gleichgewichte und Kalkung 99
Wasserqualität 100
Zwischenfazit Geochemische Aspekte 103

Recherchen zum Datenbestand 104
Digitale Geländemodelle für die Vorbergbau-Zeit und die Nachbergbau-Zeit 104
Leitnivellements seit Beginn des modernen Braunkohlenbergbaus 104
Hydrologische Daten 105
Numerische Grundwassermodelle und Prognosen 106
Geologische Bohrprofile 107
Bodenkundliche Kartenwerke 107
Bergschäden 107
Zwischenfazit recherchierter Datenbestand 109

Beantwortung der Fragen 110

Quellenverzeichnis 129

Disclaimer

Die hier kartenmäßig dargestellten Informationen wurden aus zahlreichen Quellen zusammengestellt und dienen lediglich der Übersicht. Die Karteninformationen sind aufgrund ihres Maßstabs nicht geeignet Aussagen bezüglich einzelner Grundstücke oder konkreter Schadensfälle zu machen.

Aus dem Gutachten und den darin enthaltenen Informationen abgeleitete Schlüsse oder Entscheidungen des Nutzers fallen allein in dessen Verantwortung.

Kurzfassung

Die Braunkohlelagerstätten des Rheinischen Reviers entstanden während des Miozäns in Küstensümpfen der sich einsenkenden Niederrheinischen Bucht. Diese Grabenstruktur, mit mehr als 1000 m mächtigen tertiären Meeressanden, Lagunen- und Fluss-Sedimenten und Braunkohlen sowie quartären Fluss-Terrassen, ist Teil des ausgedehnten und bis heute tektonisch aktiven zentraleuropäischen Rift-Systems. Tektonisch wird die Niederrheinische Bucht durch synsedimentär aktive Graben-Störungen in die Rur-Scholle, die Erft-Scholle, die Kölner Scholle und die Venloer Scholle unterteilt, wodurch auch mehr oder weniger eigenständige hydrogeologische Teilräume entstanden sind.

Der Braunkohlenbergbau konzentriert sich heute auf die Großtagebaue Inden, Hambach und Garzweiler und erfordert sehr umfangreiche Maßnahmen zur Wasserhaltung („Sümpfung“). Durch die Sümpfung werden die Grundwasserstockwerke lokal (Tagebau Hambach) bis zu 450 m Tiefe leer gepumpt und in größeren Tiefen und Entfernungen teilentspannt. Dort wo grundwasserstauende Schichten ausgebildet sind, sind bereichsweise schwebende Grundwasserkörper erhalten geblieben, während die darunter liegenden Grundwasserleiter weitreichende Absenkungstrichter aufweisen, in denen die entleerten Porenräume belüftet worden sind.

Die Auswirkungen der Sümpfungsmaßnahmen in der Rur-Scholle, für den Tagebau Inden, reichen bis in die Niederlande, wobei die stärksten Grundwasserabsenkungen im Bereich der Rur-Auen nahe der Ortslage Schophoven erfolgen. Die Erft-Scholle ist in weiten Teilen bereits bis in mehrere hundert Meter Tiefe leer gepumpt und soll bis zur Erreichung der maximalen Abbautiefe im Tagebau Hambach im Jahr 2030 weiter gesümpft werden. In der Kölner Scholle sind hingegen die älteren Tagebaue in der Ville bereits weitgehend rekultiviert und das Grundwasser ist dabei wieder anzusteigen. In der Venloer Scholle wird für den Tagebau Garzweiler II jedoch weiterhin Grundwasser gesümpft. Besonders nördlich und westlich des Tagebaus Garzweiler wird Sümpfungswasser dafür verwendet, durch Versickerungsmaßnahmen die oberen Grundwasserkörper und die Fließgewässer anzureichern.

In erster Näherung steigt die zu fördernde Grundwassermenge in der dritten Potenz zur Absenkungstiefe. Die Flächenausdehnung des Absenkungstrichters wächst in etwa im Quadrat mit der Absenkungstiefe.

In den gesümpften Lockergesteinsschichten geht als Folge des Wasserentzugs die Auftriebswirkung verloren, sodass weitgehend irreversible Setzungen und damit verbundene Absenkungen der Oberfläche eintreten. Die Bodensenkungen erfolgen proportional zur Absenkung des Grundwasserspiegels und machen ca. 1,5 Prozent davon aus. Die stärksten Bodensenkungen werden in der Erft-Scholle bei Elsdorf beobachtet, von bisher (Stand 2013) ca. 4,6 m. Diese Bodensenkungen haben ihren Ursprung in den Sümpfungsmaßnahmen für die älteren Tagebaue Bergheim und Fortuna-Garsdorf, werden aber durch die weiter fortschreitende Grundwasserabsenkung für den Tagebau Hambach weiter zunehmen und sich mit ihrem Zentrum zum Tagebau hin und dann Richtung Berrendorf-Wüllenrath und Heppendorf weiterentwickeln. Die maximale Bodensenkung kann dann ab ca. 2030 Werte um 7 m erreichen.

In der Nachbetriebszeit sollen die Tagebau-Restlöcher und die entleerten Grundwasserleiter durch Überleitungen von Flusswasser aus Rhein und Rur geflutet werden. Aufgrund der in den Tagebauen nicht mehr vorhandenen Trennungen in einzelne Grundwasserstockwerke, und aufgrund des hydraulischen Potentialausgleichs über die ausgedehnten Seenflächen, werden sich veränderte Grundwasserstände und Strömungen einstellen. Dabei bilden die Zielpegel der Restlochseen Blausteinsee (+129m NHN) des ehemaligen Tagebaus Zukunft-West über den Inden-See (+92 m NHN) und Hambach-See (+65 m NHN) bzw. Garzweiler See (+65 m NHN) zur abgesenkten Erft (kleiner +60m NHN) hin eine Kaskade. Es ist fraglich, ob aufgrund der bergbaulich stark veränderten hydrogeologischen Verhältnisse diese vorgesehenen Pegelstände erreichbar sein werden, oder ob und in welchem Umfang zwischen den Seen ein hydraulischer Druckausgleich über den durchlässigen Untergrund erfolgen wird. Mit Blick auf diese Fragestellungen sollte die Zuverlässigkeit der numerischen Grundwassermodelle kritisch geprüft werden, insbesondere hinsichtlich der tatsächlichen hydraulischen Wirkungen der schollentrennenden Störungen.

Insgesamt ist die Erft-Scholle am stärksten von den Grundwasserabsenkungen und Bodensenkungen betroffen. Die Erft-Auen zwischen Bedburg und Erftstadt waren einst ein Sumpfgebiet, welches schon vor Beginn des Bergbaus trockengelegt wurde. Die späteren, durch den Braunkohlenbergbau verursachten, sümpfungsbedingten Bodensenkungen werden nach Flutung der Tagebau-Restlöcher (ca. 2100) infolge der veränderten Grundwasserstände und dem stärkeren Grundwassergefälle zur Vorflut hin in einigen Bereichen permanente Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich machen um Vernässungen zu verhindern und Bauwerke und Infrastruktur zu schützen (Ewigkeitslasten). Durch Gefälleveränderungen entlang der Erft werden zwischen Bergheim und Bedburg zunehmend stagnierende Verhältnisse eintreten, mit einem verstärkten Potential für Überflutungen in niederschlagsreichen Perioden.

Außerhalb des Absenkungsmaximums in der Erft-Scholle kann von weitreichenden, aber geringeren Bodensenkungen (in der Regel < 1 m) ausgegangen werden, die überdies großräumig und stetig erfolgen. Da die „gesamte Landschaft“ einschließlich der Vorfluter absinkt, werden sich dort, nach Grundwasserwiederanstieg, auch die Grundwasserflurabstände in etwa den vorbergbaulichen Verhältnissen wieder annähern.

Beim Anstieg des Grundwassers in Kippenmassiven muss mit Setzungen und Sackungen von 2 bis 2,5 Prozent der Kippenmächtigkeit gerechnet werden, so dass in Anbetracht der großen Mächtigkeiten bis ca. 400 Meter Senkungsbeträge von 8 Meter und ggf. mehr erreicht werden können. Besonders an den Rändern von Kippenmassiven, aber auch entlang von inneren Unstetigkeiten, z.B. infolge blockweiser Verkippung unterschiedlicher Substrate, können dabei Geländestufen entstehen.

Schädliche Veränderungen des Baugrundes durch Vernässungen und/oder Schiefstellungen oder differenzielle Setzungen mit der Folge von Schäden an Bauwerken können sowohl während der Sümpfung als auch während des Wiederanstiegs des Grundwassers eintreten. Als Ursachen sind besonders der aerobe Abbau von Torf und Braunkohle beim Trockenfallen, sowie unterschiedliche oder unterschiedlich schnelle Setzungen an hydraulisch aktiven Störungen bei Grundwasserentzug zu nennen.

Seismische Risiken könnten aus den massiven Massenumlagerungen bei der Flutung der Tagebauseen und entleerten Grundwasserleiter in dem tektonisch aktiven Gebiet erwachsen.

Standsicherheitsrisiken für die Tagebausohlen (hydraulischer Grundbruch) und Böschungen sowie für die Kippenmassive (Bodenverflüssigung) während der Flutung müssen für alle zu durchlaufenden Bauzustände betrachtet und durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Für die Wasserwirtschaft der Niederrheinischen Bucht werden erhebliche Mengen- und Qualitäts-Probleme bei der Bereitstellung von Brauch- und Trinkwasser in der Nachbergbau-Ära erwartet. Diese resultieren einerseits aus dem Wegfall der bislang wasserwirtschaftlich nutzbaren Sümpfungswässer und andererseits aus der verschlechterten Wasserqualität infolge von Pyrit-Oxidation und in die Grundwasserleiter eingeschleppten Schadstoffen über ungereinigtes Flusswasser bei der Flutung, die eine Nutzung als Trinkwasser nicht zulassen. Durch die hohen Sulfatkonzentrationen im Grundwasser können auch Angriffe auf Betonbauwerke nicht ausgeschlossen werden.

Während der Flutung der entleerten Grundwasserleiter wird die durch Belüftung entstandene Bodenluft wieder verdrängt und kann insbesondere an fokussierten Austrittsorten zu erhöhten Radon-Konzentrationen führen, die abgeschätzt und ggf. überwacht werden sollten.

Einführung und Problemstellung

Aktueller Sachstand

Im Rheinischen Revier wird seit über 100 Jahren Braunkohle gewonnen, anfangs besonders aus oberflächennahen Lagerstätten in der Ville. Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat sich der Bergbau auf immer weniger Tagebaue reduziert, während Größe und Tiefe zugenommen haben. Heute wird Braunkohle aus den Großtagebauen Inden, Hambach und Garzweiler gefördert. Der Tagebau Hambach soll bis 2030 eine Tiefe von ca. 465 Metern erreichen.

Neben den Auswirkungen der Tagebaue auf die Natur und Siedlungsstruktur wird insbesondere der Wasserhaushalt der Region massiv beeinträchtigt, denn für den Tagebaubetrieb muss das Grundwasser bis unter das Abbauniveau durch Pumpen abgesenkt („gesümpft“) werden. Durch den Grundwasserentzug kommt es zu unterschiedlich starken Senkungen an der Tagesoberfläche, wodurch wiederum Bergschäden an Gebäuden, Straßen, Kanalisation usw. aber auch auf landwirtschaftlich genutzten Flächen entstehen können.

Wegen der regionalen Ausdehnung der Grundwasserleiter lässt sich die Absenkung des Grundwassers nicht auf das Gebiet des jeweiligen Tagebaus beschränken. Es kommt zu weitreichenden Absenkungen des Grundwassers und als Folge davon zu Setzungen in den Lockergesteinen und damit zu Senkungen des Bodens im weiteren Umfeld der Tagebaue. Durch die komplexe Struktur des tektonisch gestörten geologischen Untergrundes kann sich die Oberfläche lokal auch unterschiedlich stark absenken, sodass es zu Schiefstellungen, Erdstufen und Erdspalten kommen kann.

Prognosen zu den Bodenabsenkungen und der Nachweis kausaler Zusammenhänge mit dem Bergbau sind im Einzelfall schwierig. Das heutige, durch Messungen nachgewiesene Senkungsmaximum von ca. 4,60 m seit 1955 bei Elsdorf ist nur als Zwischenstadium anzusehen und wird sich bis Ende der Sümpfungsmaßnahmen weiter in Richtung Heppendorf verlagern und vermutlich ca. 7 m erreichen.

Nach derzeitigen Planungen werden in den drei heute noch aktiven Großtagebauen Restlöcher verbleiben, die mit Flusswasser aus Rhein und Rur geflutet werden sollen. Die Einstellung der Seeoberflächen dieser Restseen wird erst gegen Ende des Jahrhunderts, die Einstellung neuer stationärer Grundwasserstände teilweise erst Mitte des nächsten Jahrhunderts erfolgen.

Die möglichen Bergschäden sowie Ewigkeitslasten nach Wiederanstieg des Grundwassers wurden wegen der langen Zeiträume bisher zu wenig betrachtet. So muss die bodenmechanische Stabilität der Tagebauböschungen und der Tagebausohle auch in allen zu durchlaufenden Flutungsstadien gewahrt bleiben. Die umgelagerten Abraum-Massen der Kippen werden voraussichtlich auf den Grundwasseranstieg mit starken Setzungen und Sackungen reagieren.

Außerhalb der Tagebaue kann es durch den Wiederanstieg des Grundwassers zu Hebungen der Oberfläche kommen. Andererseits ist zu befürchten, dass das Grundwasser wegen der eingetretenen Bodensenkungen über die vorbergbaulichen Flurabstände hinaus ansteigen könnte, im Extrem sogar über das Oberflächenniveau hinaus. Steigende Grundwasserstände

und Vernässungen könnten bergbaubedingt trocken gelegte Gebiete betreffen, z.B. in den Niederungen von Erft und Rur, die inzwischen bebaut wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass solche Gebiete aufgrund der inzwischen stark abgesenkten Tagesoberfläche (ca. 2 – 3 m z.B. in Bergheim) dauerhaft gesümpft werden müssen (Ewigkeitslasten).

Aufgrund der weitgehend leer gepumpten Grundwasserleiter werden mit Wegfall des derzeit nutzbaren Sümpfungswassers auch wasserwirtschaftliche Engpässe entstehen. Auch die chemische Beschaffenheit des zukünftigen Grundwassers wird aufgrund der sümpfungsbedingt induzierten Pyrit-Oxidation eine Nutzung als Trink- und Brauchwasser stark einschränken.

Zielstellung

Der Auftraggeber möchte durch gezielte Arbeit darauf hinwirken können, dass private Hausbesitzer, Gewerbebetriebe, Landwirte und Kommunen nicht vor Schäden durch den Wiederanstieg des Grundwassers stehen, die bei entsprechender Kenntnislage vermeidbar gewesen wären.

Vor diesem Hintergrund wurde vom Auftraggeber eine detaillierte Fragestellung bezüglich des Wiederanstiegs des Grundwassers im Rheinischen Braunkohlerevier formuliert, die am Ende der Studie abgearbeitet wird.

Geologische Grundlagen

Das ca. 4.000 km² überdeckende Arbeitsgebiet (Abbildung 1) umfasst große Teile der Niederrheinischen Bucht, die durch Grundwasserabsenkungen des Braunkohlenbergbaus betroffenen sind. Aufgrund des zu bearbeitenden Themenkomplexes ist das Arbeitsgebiet im Wesentlichen identisch mit dem Tätigkeitsgebiet des Erft-Verbandes, in dessen Zuständigkeit u.a. die Überwachung und Bewirtschaftung der vom Braunkohlenbergbau beeinflussten Grundwasservorkommen liegt.

Abbildung 1 – Lage und Ausdehnung des Arbeitsgebietes, das ungefähr dem Tätigkeitsbereich des Erftverbandes entspricht. (Nach Erftverband 2013)

Im Nordosten grenzt die Niederrheinische Bucht über ein System von Staffelbrüchen an das Bergische Land, im Südwesten an das Hohe Venn und Venn-Vorland. Die Südbegrenzung wird von dem aus der Bucht auftauchenden paläozoischen Mittelgebirge der Nord-Eifel und dem Eifeler (Mechernicher) Trias-Dreieck gebildet.

Tektonik

Die Niederrheinische Bucht ist eine im Tertiär und Quartär tektonisch abgesunkene Grabenstruktur, die Teil des weitgespannten känozoischen, bis heute tektonisch aktiven zentraleuropäischen Riftsystems ist (Klostermann 1983; Nickel 2003; Ziegler 1994). Siehe Abbildung 2. Nach dem Einsinken des Vikinggrabens und Zentralgrabens in der Nordsee um über 1000 m ab dem Paläozän, setzte im Oligozän die Absenkung auch weiter im Südwesten in der Niederrheinischen Bucht ein.

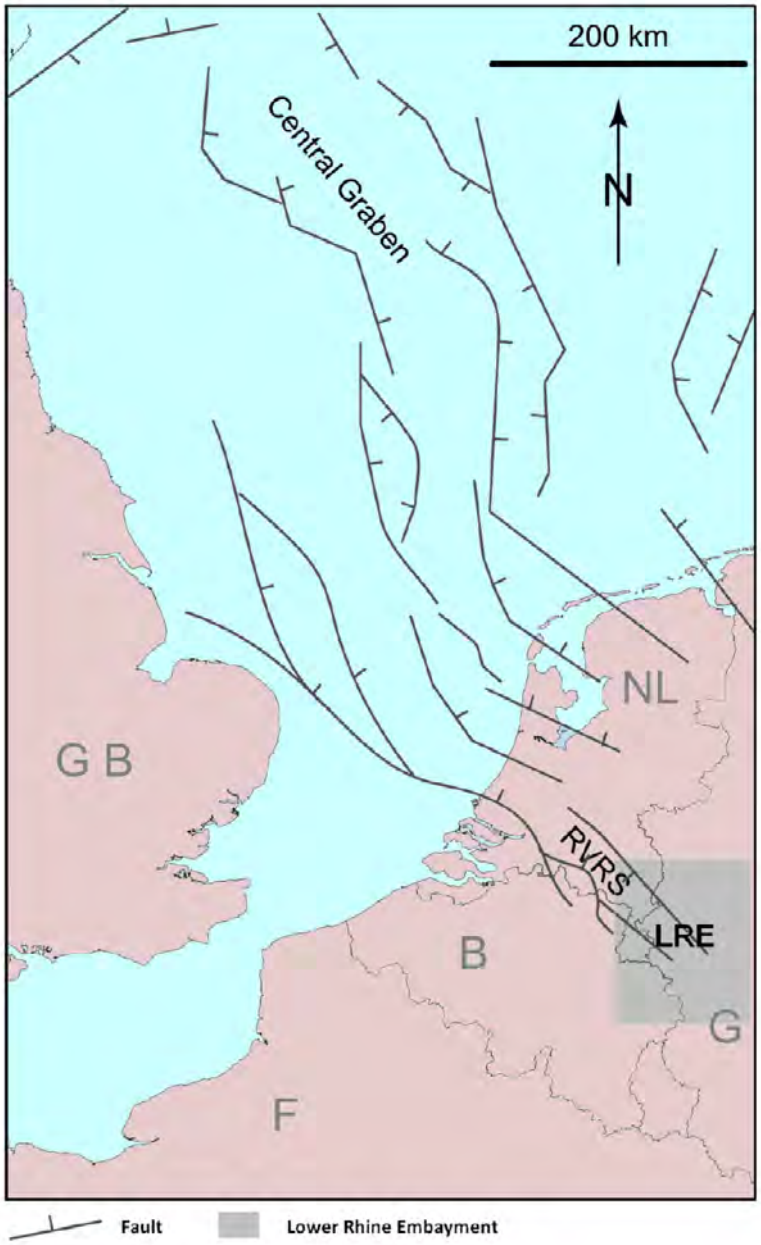


Abbildung 2 – Lage des Rurtal-Grabens (RVRS; Roer valley rift system) und der Niederrheinischen Bucht (LRE) in Relation zum Nordseebecken mit dem Zentralgraben (Modifiziert, aus Gumm 2011).

Als Folge dieser Rift-Tektonik ist die Niederrheinische Bucht von etlichen synsedimentär aktiven, NW-SE streichenden Störungslinien (sog. „Sprüngen“) in die Kölner, Erft-, Rur-, Krefelder und Venloer Schollen untergliedert (Siehe Abbildungen 3 und 4). Die Rur-Scholle stellt den südwestlichen Ausläufer des niederländischen Zentralgrabens dar.

Die bis heute nachweisbare Absenkung begann im Oligozän (vor ca. 30 Mio. Jahren) und hat sich in ihrem lokalen Maximum am Erft-Sprung seither auf 900 bis 1000 m aufsummiert (Ahorner 1962). Detaillierte Betrachtungen zur Störungstektonik finden sich bei Knufinke und Kothen (1997). Die Basis der flachmarinen Meeresablagerungen des Oligozäns („Tertiärbasis“) liegt am Ostrand der am tiefsten abgesunkenen Erft-Scholle bis zu 1200 m unter dem heutigen Meeresspiegel-Niveau (Normalhöhennull; NHN). Siehe Abbildung 5.

Die bis heute aufsummierte Dehnung der Erdkruste quer zur Niederrheinischen Bucht beträgt 1,5 bis 2 km (Knufinke und Kothen 1997).

Die tertiären und quartären Schichten fallen westlich des Erft-Sprungs, also in Erft- und Rur-Scholle, flach in nordöstlicher Richtung ein und werden an den überwiegend mit 65° bis 68° nach Südwest einfallenden Verwerfungen zumeist antithetisch versetzt (Becker und Asmus 2005; Cuvelier 2005; Klostermann 2010; Wegner 2014). Östlich des Erft-Sprungs, also in der Kölner Scholle, ist das Schichteinfallen nach Südwest gerichtet und der Versetzungssinn ist überwiegend synthetisch.

Die Untergrenze der altpleistozänen Hauptterrassen-Schichten des Rhein-Maas-Systems (ca. 783.000 a vor heute) ist an Störungen um maximal 140 m versetzt, ihre Oberfläche, die vor etwa 700.000 Jahren als ausgedehnte Überflutungsfläche eines verwilderten Fluss-Systems (braided river) gebildet worden ist, ist um bis zu 60 m versetzt. Die jüngsten Löß-Ablagerungen aus der Würm-Kaltzeit (Jungpleistozän; 115.000 bis 10.000 Jahre vor heute) weisen nur noch einen vertikalen Versatz von wenigen Metern auf. Die durchschnittliche Bewegungsrate macht, über längere geologische Zeiträume gemittelt, etwa 0,05 bis 0,10 mm/a aus. Aus geodätischen Feinnivellements geht hervor, dass die rezenten, als tektonisch (nicht Bergbau-bedingt) angesehenen Schollenbewegungen stellenweise bis zu 0,9 mm/a erreichen können (Ahorner 2001; Klostermann 1988).

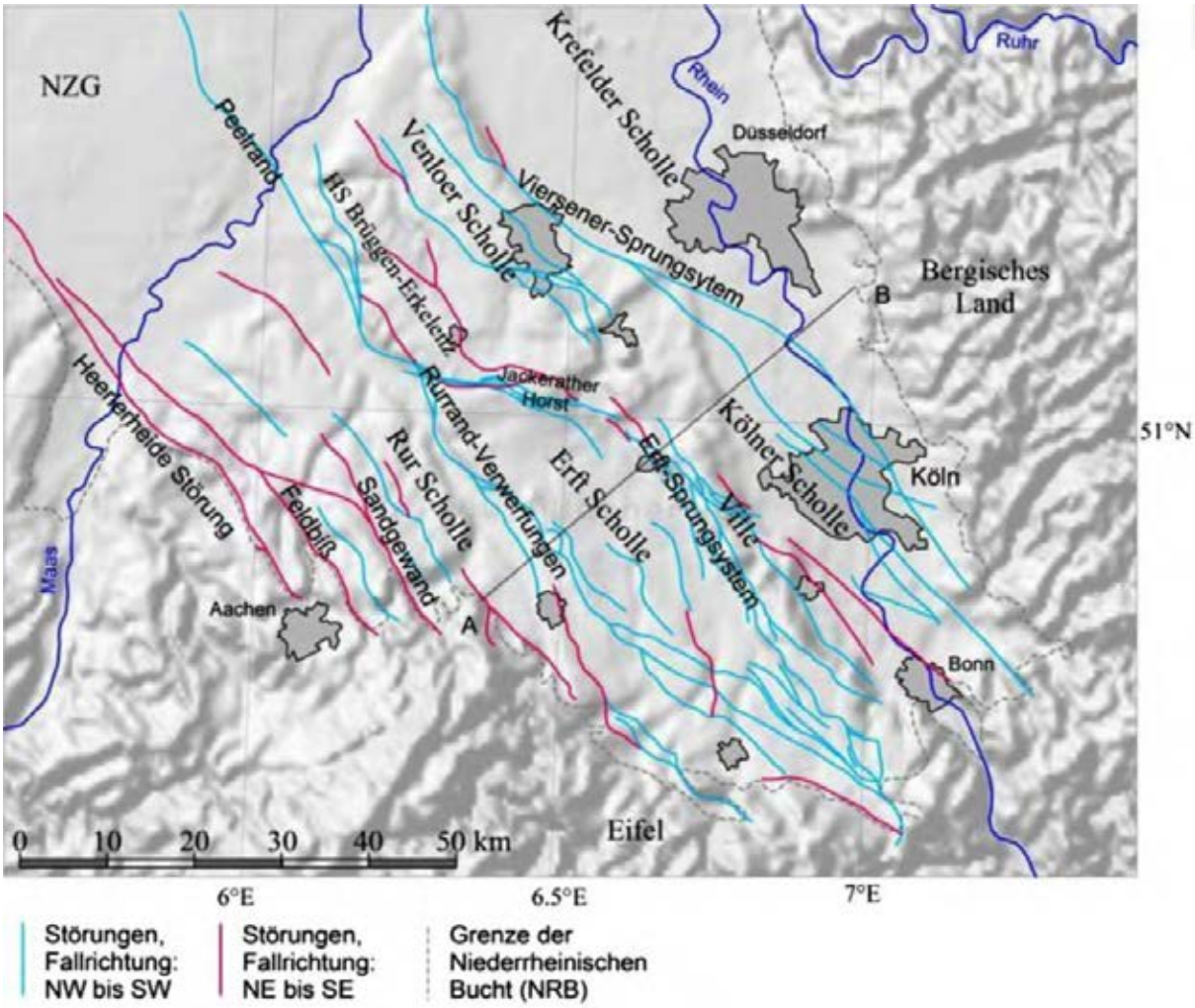


Abbildung 3 – Haupt-Störungslinien und tektonische Schollen in der Niederrheinischen Bucht. (Nach Wegner 2014)

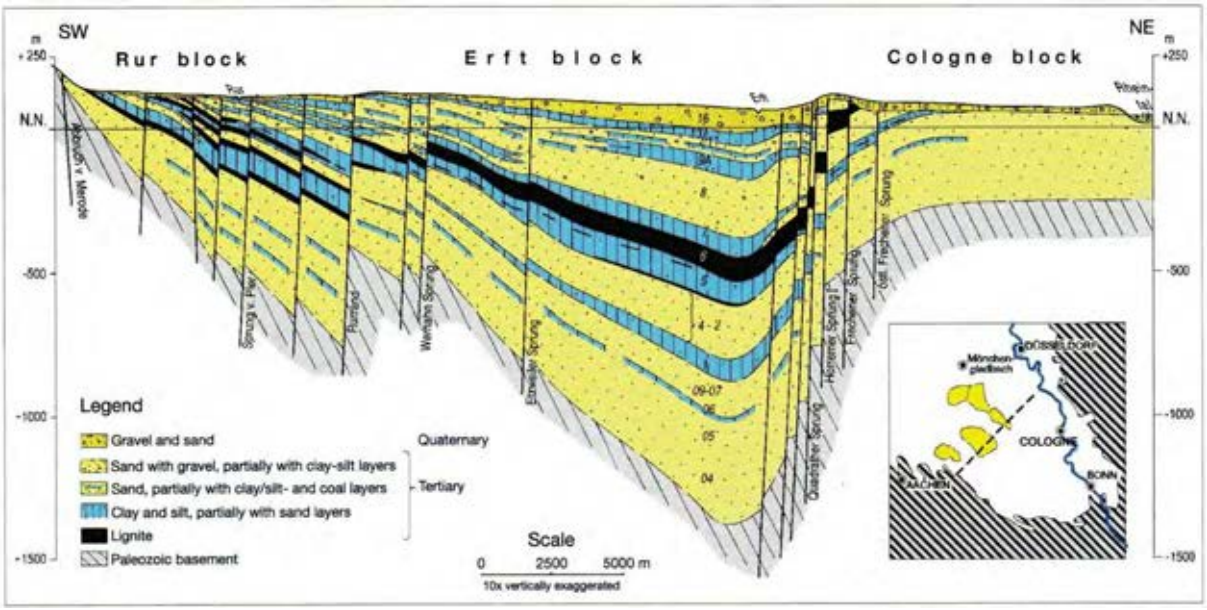


Abbildung 4 - Schnitt durch die Niederrheinische Bucht. Schnittlage Siehe Index-Karte mit angezeigten Braunkohle-Tagebauen. (Anrufungsstelle Bergschäden 2014)

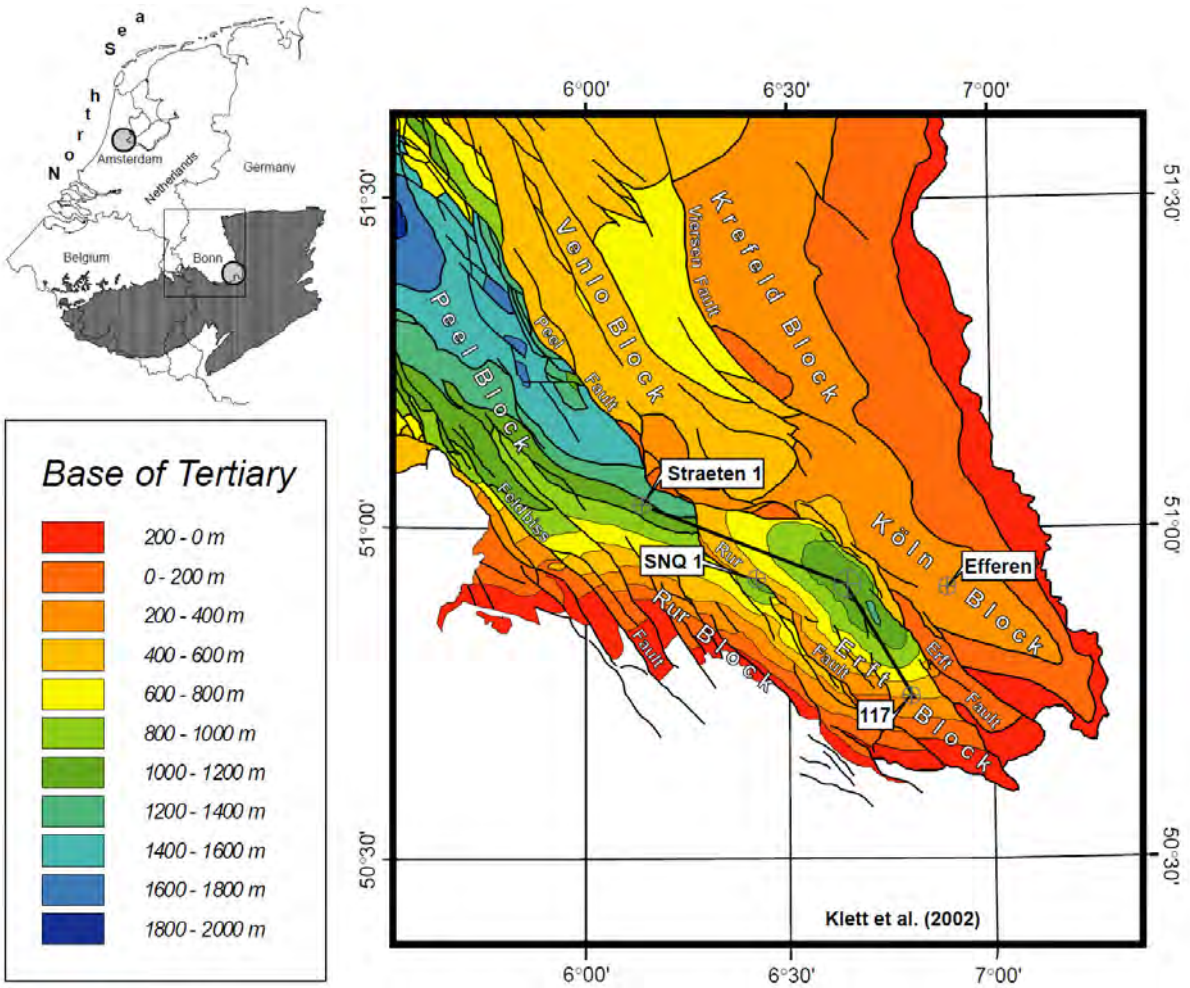


Abbildung 5 - Tiefenlage der Tertiär-Basis (nach Klett et al. 2002)

Abbildung 6 zeigt alle bekannten Störungen, die durch die Tagebau-Aufschlüsse sowie die Lagerstättenerkundung durch die RWE Power AG und ihre Vorgänger recht gut bekannt sind. Demnach ist in NE-SW-Richtung in Abständen von 200 m bis 300 m jeweils mit einer Störung zu rechnen. Die vertikalen Versetzungsbeträge liegen zwischen null bis über 300 Meter. Die großen Hauptstörungszonen mit größeren Versetzungsbeträgen sind in der Regel engständige Störungsstaffeln.

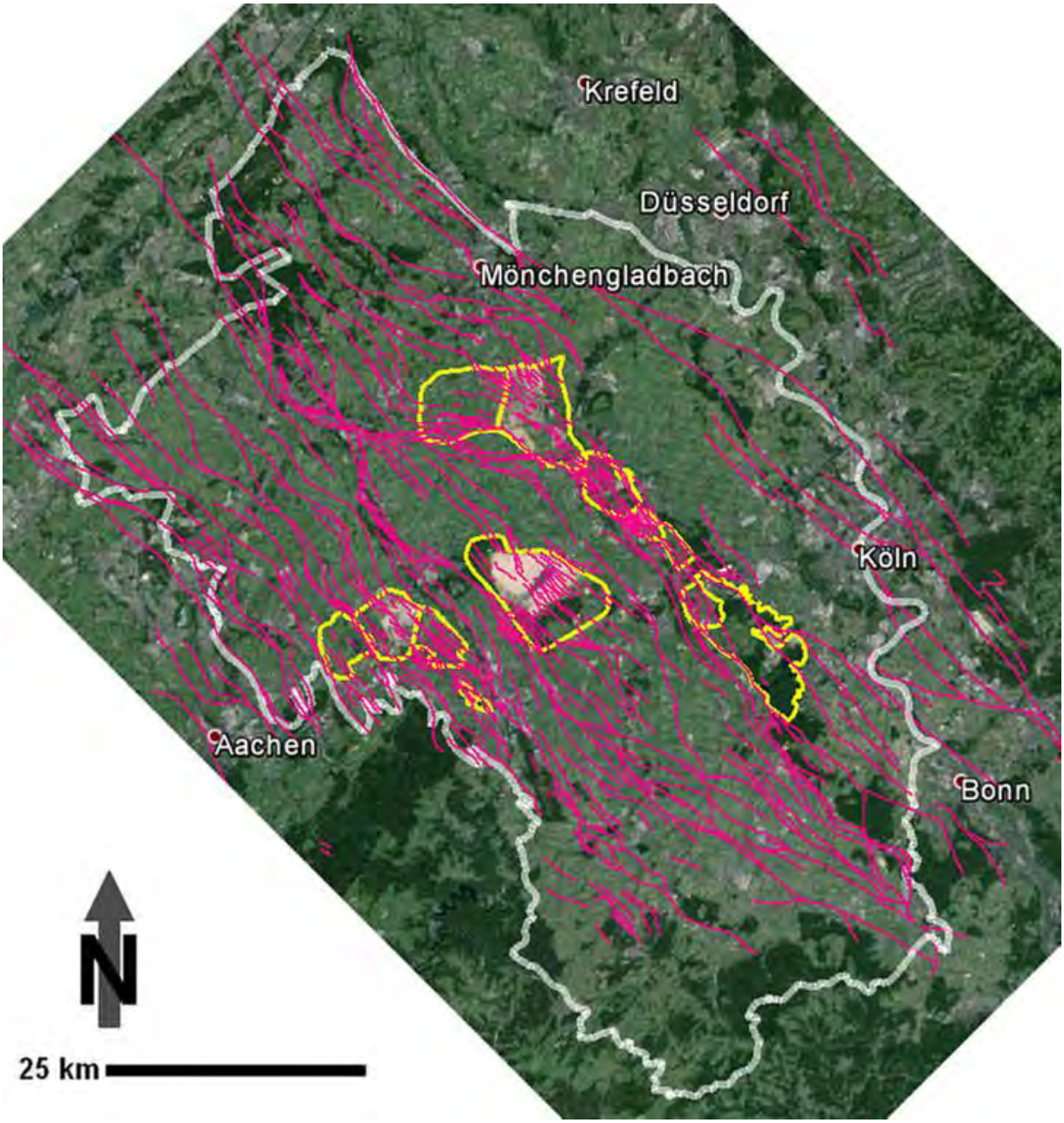


Abbildung 6 - Arbeitsgebiet (weiße Umrandung) mit bekannten Störungen (rot) und Lage der Tagebaue (gelb). Luftbildgrundlage: Google Earth, Störungen zusammengestellt nach Erft-Verband (2015) und weiteren, unten zitierten Einzelunterlagen.

Die Störungen zeichnen sich entlang ihres Verlaufs durch variable Sprunghöhen und Aufspaltungen aus, wie von Knufinke und Kothen (1997) am Beispiel des ehemaligen Tagebaus Bergheim aufgezeigt (Abbildung 7).

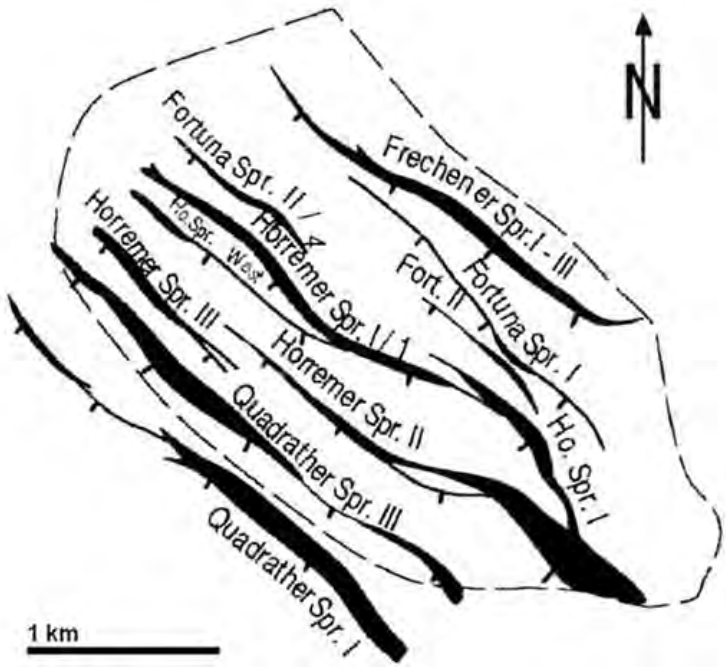


Abbildung 7 – Störungen mit Aufspaltungen und wechselnden Sprunghöhen im ehemaligen Tagebau Bergheim. Nach Knufinke und Kothen (1997)

Außerdem sind die Störungen häufig gestaffelt („en échelons“), d.h. sie laufen aus, um etwas seitlich versetzt erneut einzusetzen. Dadurch bilden sich sogenannte Staffelrampen (relay ramps) (Abbildung 8), die als wasserdurchlässige Bereiche auch hydrogeologische Bedeutung haben.

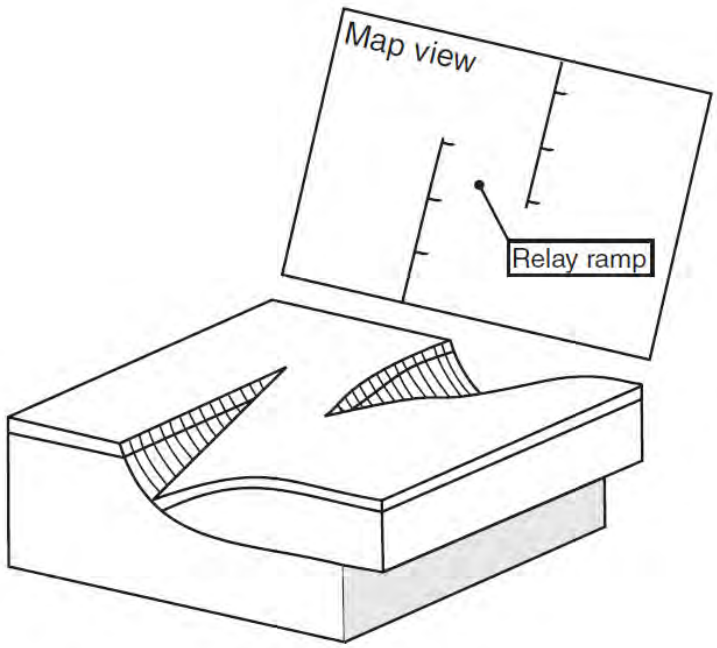


Abbildung 8 – Schematische Darstellung einer Störung mit Staffelrampe (delay ramp). Aus Bense und van Balen (2004).

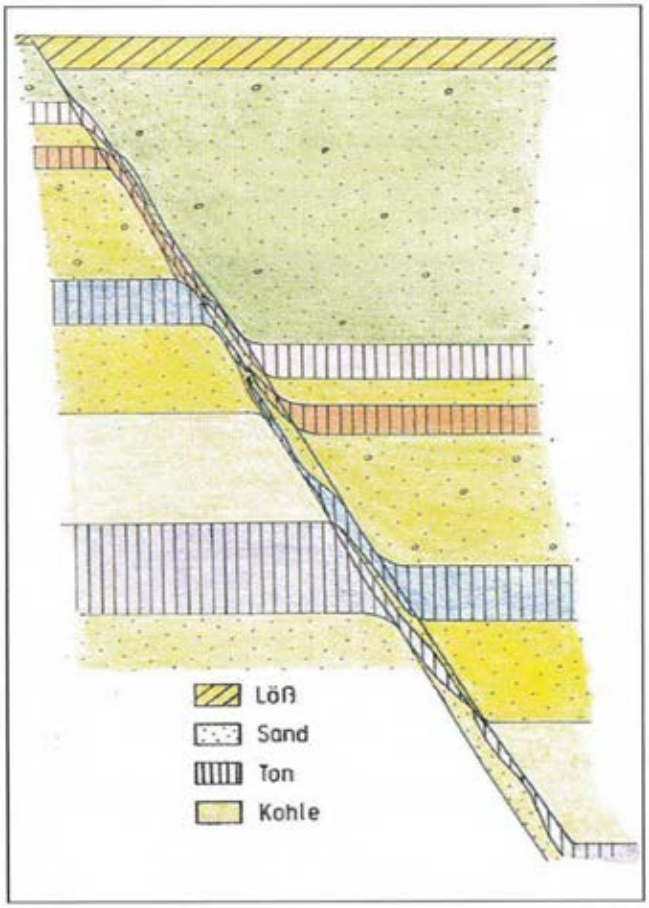


Abbildung 9 – Schematische Darstellung einer synsedimentär aktiven Störung mit größeren Schicht-Mächtigkeiten in der abgesenkten Scholle. Die Skizze zeigt auch die in die Störungsfläche eingeschleppten Tone, die eine hydraulische Abdichtung der Störung bewirken können. Aus Knufinke und Kothen (1997).

In die Störungsflächen sind häufig tonige Sedimente eingeschleppt worden, wodurch die laterale Wasserdurchlässigkeit lokal stark herab gesetzt sein kann. Eine Prinzipskizze (Abbildung 9) aus Knufinke und Kothen (1997) soll dies verdeutlichen.

Ein reales Beispiel einer Störung ist in Abbildung 10 abgebildet. Man erkennt, wie die Sedimente entlang der Störungsfläche geschleppt worden sind und wie insbesondere der Ton (Clay) hier lokal eine abdichtende Wirkung hat.

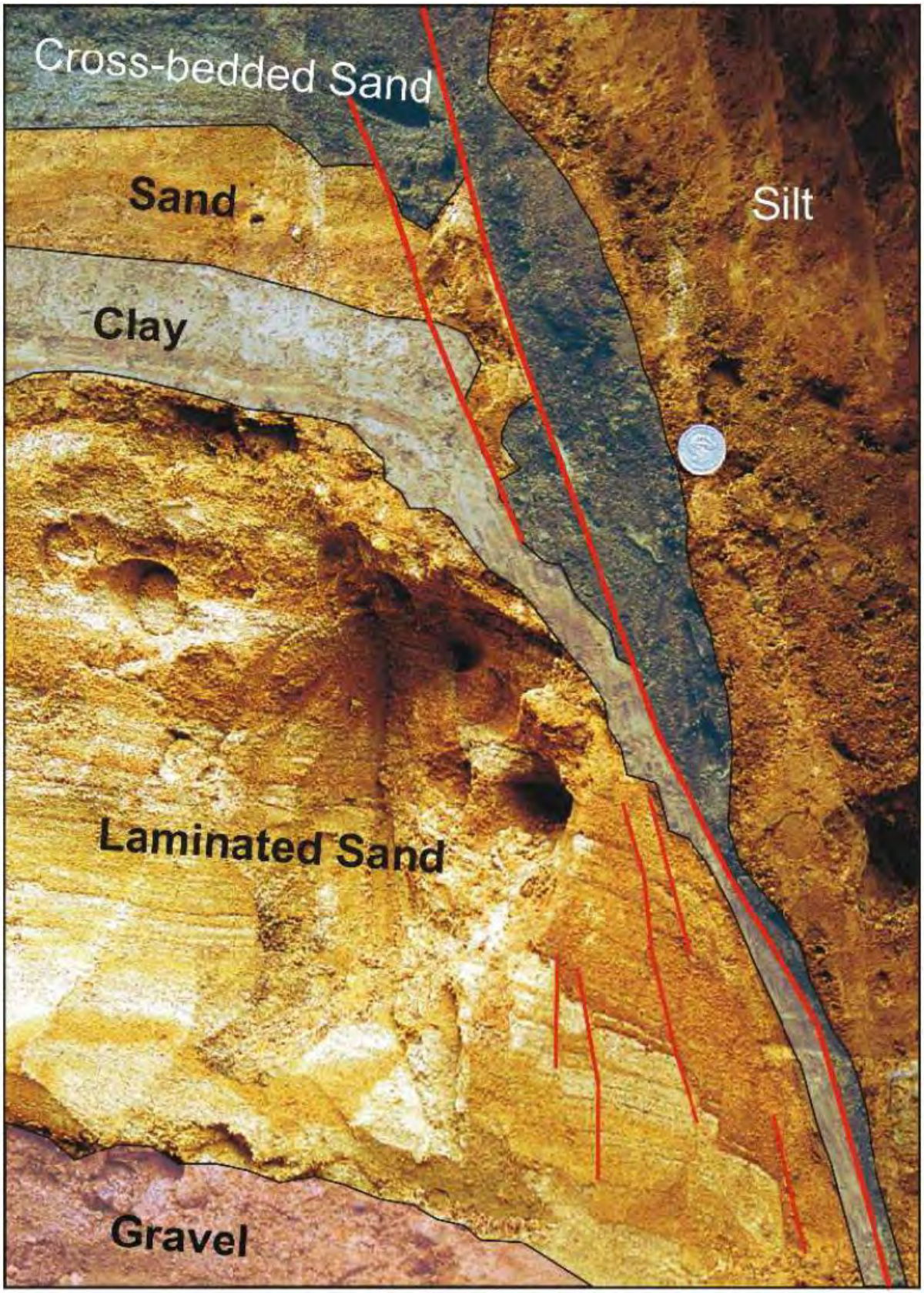


Abbildung 10 – Detail-Aufnahme einer in einem Braunkohlentagebau aufgeschlossenen Störungszone. Man erkennt den ausgeschmierten Ton auf der Störungsfläche. (Aus Gumm 2011)

Zwischenfazit Tektonik

Hinsichtlich der Fragestellungen dieser Studie bleibt hier festzuhalten, dass die Niederrheinische Bucht Teil ein aktives Riftgrabensystems ist und von zahlreichen NW-SE-streichenden Störungen durchzogen wird, die bis heute aktiv sind. Die tektonisch bedingten Vertikalbewegungen, die in der Größenordnung von etwa 0,05 bis 0,10 mm/a liegen, können von den bergbaubedingten Bewegungen, die in der Regel schneller erfolgen (1 bis 10 mm/a), überlagert werden.

Die subparallel in NW-SE-Richtung verlaufenden Störungen haben in Querrichtung charakteristische Abstände von ca. 200 bis 300 m, bei Versetzungsbeträgen zwischen null bis über 300 Meter. Die Hauptverwerfungen mit großen Versetzungsbeträgen sind meist engständige Störungsstaffeln.

Es gibt Hinweise darauf, dass im Arbeitsgebiet viele Störungen zumindest abschnittsweise hydraulisch abdichtenden Charakter haben, insbesondere dort, wo Grundwasser leitende Horizonte abgeschnitten und gegen Grundwasserstauer versetzt, sowie in Bereichen in denen Tone in die Störungszone eingeschleppt worden sind. Andererseits ist nicht davon auszugehen, dass Störungen grundsätzlich hydraulisch abdichtend wirken. Es sind beispielsweise häufig Staffelrampen zwischen Störungsabschnitten ausgebildet, die hydraulische Querverbindungen darstellen.

Tertiär

Überblick: Während der Kreide-Zeit und auch noch im frühen Tertiär (Dan; ca. 60 bis 65 Mio. Jahre vor heute) reichte die damalige „Nordsee“ (das boreale Epikontinentalmeer) bis in den Raum Aachen und ins Münsterländer Becken. Grund war eine im Mesozoikum einsetzende Ära weltweit hoher Meeresspiegelstände (im Maximum ca. 270 m höher als heute) und Transgressionen, die ihre Ursache in einer verstärkten Meeresboden-Spreizung (seafloor spreading) und einer damit verbundenen starken Anhebung des Mittelatlantischen Rückens bei der Öffnung des Atlantiks hatten. Die dadurch entstandenen ausgedehnten Epikontinentalmeere bewirkten eine hohe Verdunstung, die zu einer lang anhaltenden Periode mit Treibhausklima und einem Verschwinden der polaren Eiskappen führte (Seyfried und Leinfelder 2007).

Ab dem Paläozän setzte eine Periode fallender, aber häufiger und kurzzeitig mit kleiner Amplitude schwankender Meeresspiegelstände ein (Haq et al. 1987). Das letzte Mal war die Niederrheinische Bucht während eines Hochstands im Chatt (jüngeres Oligozän; Vgl. Abbildungen 12 und 13) vollkommen mit Meer bedeckt.

Mit dem allmählichen Rückzug des Meeres aus dem Raum der heutigen Niederrheinischen Bucht kamen ab dem mittleren Paläozän erste fluviatile, aus dem Rheinischen Massiv stammende Sande und Kiese (Antweiler Schichten) zur Ablagerung, während weiter nördlich zuvor abgelagerte marine Sedimente der Erosion anheimfielen. Die Entwicklung setzte sich dann mit dem Einsinken der Niederrheinischen Bucht fort, indem von Norden her noch marine Sande und Lagunensedimente abgelagert wurden, während von der Landmasse des Rheinischen Massivs (Schiefergebirge) her zunehmend Deltasedimente geschüttet wurden, überwiegend von Vorläufern der heutigen Sieg.

Unter dem Einfluss des noch herrschenden Treibhausklimas entstand eine Abfolge aus Sanden und Schluffen, Tonen und Braunkohleflözen. Ausgedehnte tropische/subtropische Sumpfwälder und Torfmoore im Küstenbereich lieferten die organischen Ausgangsstoffe für die Braunkohlen (Teichmüller 1991). Die Nord-Süd-Gliederung des Sedimentationsraums, mit seinen Verzahnungen von marinen, brackischen und fluviatilen Ablagerungen, ist im dargestellten Längsschnitt (Abbildung 11) und in den lithostratigraphischen Tabellen (Abbildungen 12 und 13) wiedergegeben.

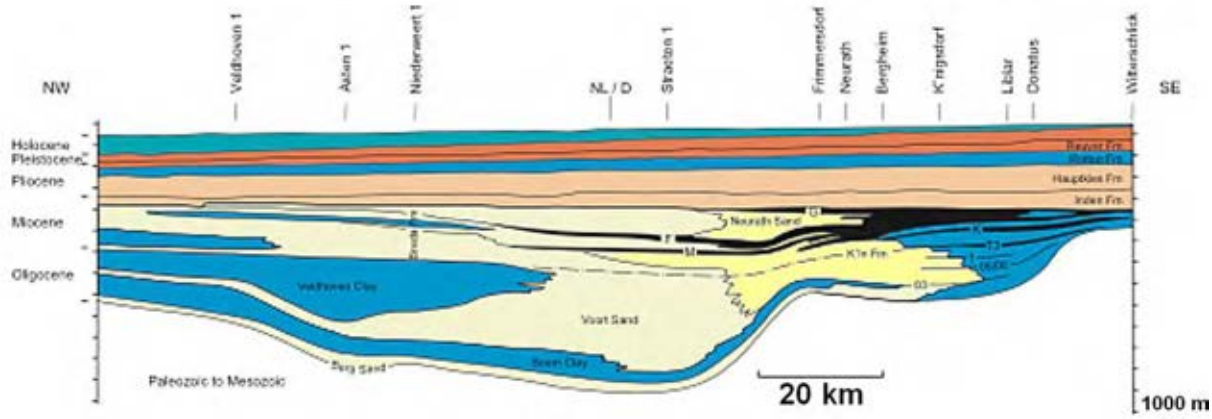


Abbildung 11 – Geologischer Längsschnitt durch die Niederrheinischen Bucht, mit komplexen stratigraphischen und faziellen Lagerungsverhältnissen im ehemaligen Küstenbereich. Gelb: Neurather Sande. Nach Klett et al. (2002)

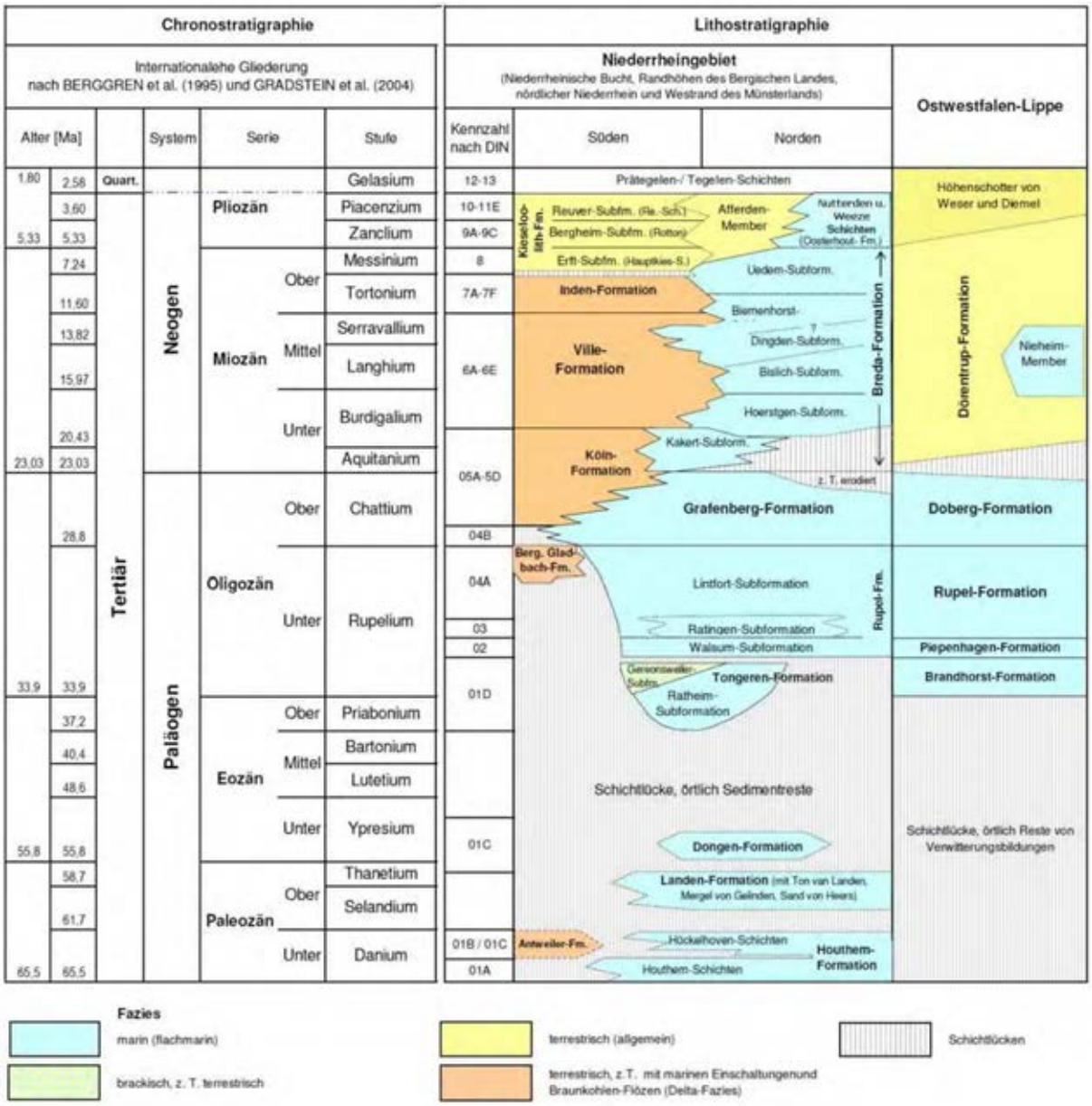


Abbildung 12 – Stratigraphische Gliederung des Tertiärs in der Niederrheinischen Bucht und Ostwestfalen. (Nach Geologischer Dienst NRW 2007)

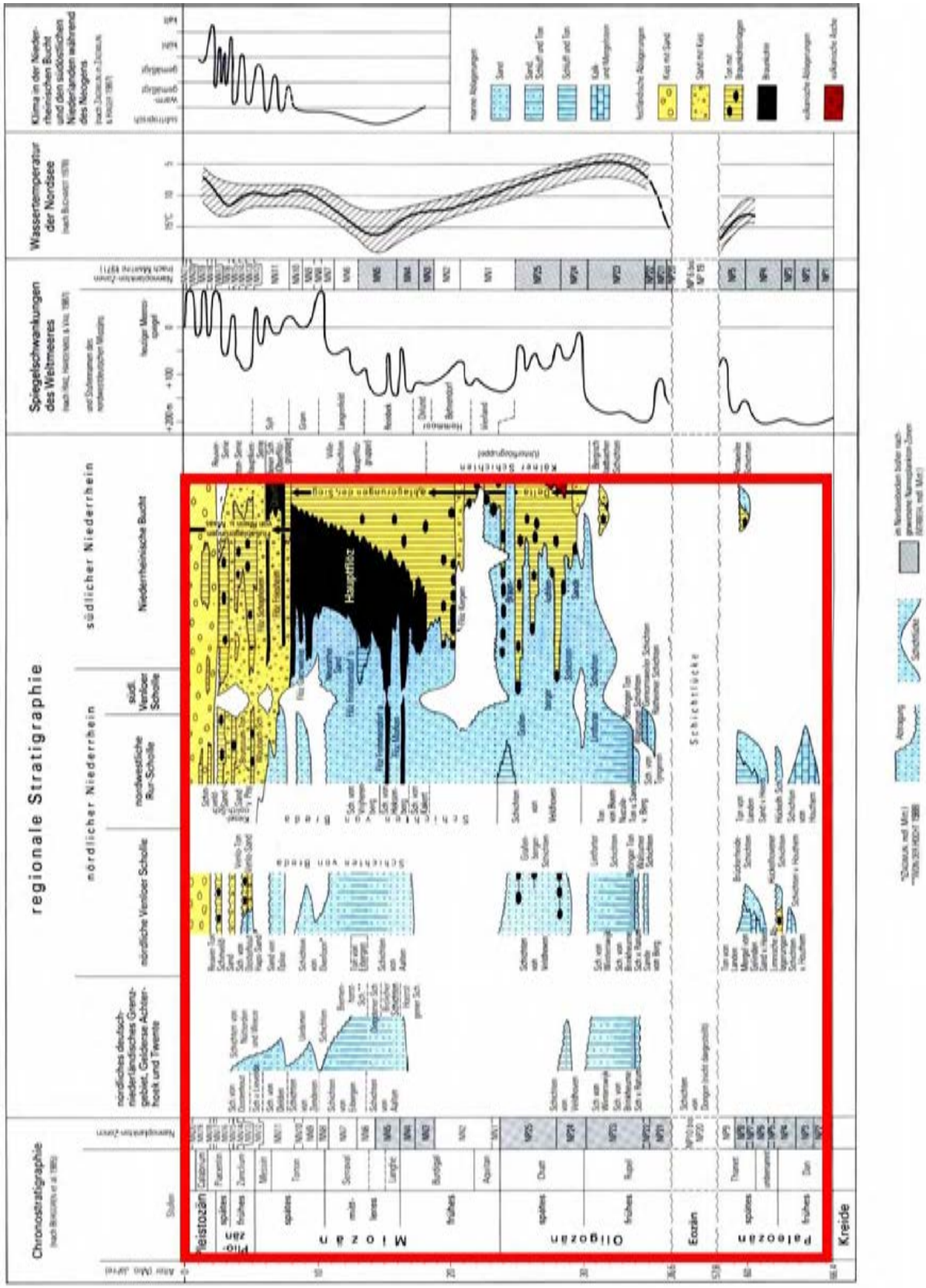


Abbildung 13 – Stratigraphische Gliederung des Tertiärs in der Niederrheinischen Bucht. (Quelle: BezReg Köln 2014)

Braunkohleverbreitung: Braunkohlen entstanden aus Torfen im Zuge der Inkohlung (Diagenese) (Walther 2002). Im Rheinischen Revier sind diese Torfe aus einer Vegetation in Küstensümpfen entstanden und zeigen eine Zonierung, welche die hydrologischen Standortbedingungen widerspiegelt (Abbildung 14).

Abbildung 14 - Rekonstruktion verschiedener Moortypen des Hauptflözes der niederrheinischen Braunkohle. (Nach Teichmüller 1991).

In der Niederrheinischen Bucht bestehen die braunkohleführenden Schichten aus den Köln-Schichten mit der (wirtschaftlich unbedeutenden) Unterflöz-Gruppe sowie den Flözen Kerpen und Morken II, gefolgt von den Ville-Schichten mit der Hauptflöz-Gruppe (Tagebaue Hambach, Inden und Garzweiler mit den Flözen Mörken I, Frimmersdorf a und b und Garzweiler) und den Inden-Schichten mit der Oberflöz-Gruppe (Flöze Friesheim, Kirchberg und Schophoven, Tagebau Inden). Siehe Abbildungen 12 und 13 sowie 28.

Während des späten Oligozäns (Chatt) und Miozäns führten die periodischen Meeresspiegelschwankungen in ihren Regressionsphasen im Bereich der damaligen Küsten zur Entstehung ausgedehnter Sumpfgebiete mit Torfmooren, die dann während häufiger Transgressionsphasen überflutet und von Meeressanden überlagert wurden. Als Folge haben sich mächtige Braunkohlenflöze gebildet. Aus dieser Periode stammen die Unterflöz-Gruppe, das ältere Hauptflöz mit seinen lateralen Äquivalenten Flöz Morken, Flöz Frimmersdorf -a und -b, sowie Flöz Garzweiler und später das Oberflöz mit seinen lateralen Äquivalenten Flöz Friesheim und Flöz Schophoven (Abbildungen 11 und 13). In Abbildung 15 sind Rekonstruktionen der Ablagerungsräume während der Entstehung der Hauptflöz-Gruppe bzw. des Oberflözes dargestellt.

Während der pliozänen Hauptkies-, Reuver- und Rotton-Serien fand eine verstärkte Absenkung der Niederrheinischen Bucht statt, mit der Folge ausgedehnter verwilderter Flüsse (braided rivers), die das Entstehen zusammenhängender Moorgebiete nicht mehr zuließ, wohl aber noch lokale Sumpfflächen zwischen den Fließrinnen, in denen Torfbildungen (spätere Braunkohle) möglich waren, die in Abbildung 13 auch schematisch dargestellt sind.

Die Moorbildung und Vertorfung endete mit der ersten Vereisungsphase vor ca. zwei Millionen Jahren zu Beginn des Pleistozäns.

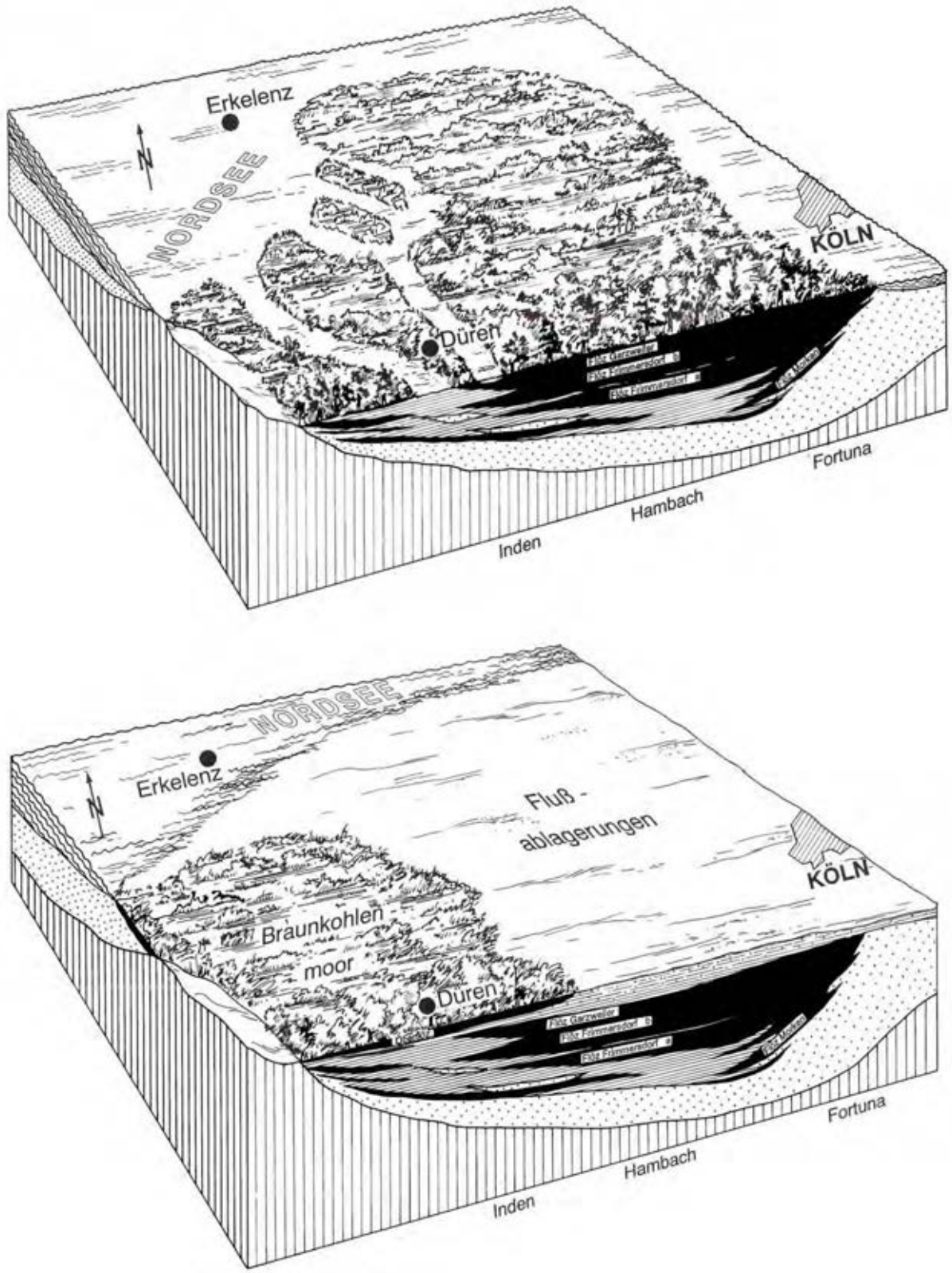


Abbildung 15 – Rekonstruktion der Ablagerungsräume der Hauptflöz-Gruppe (oben) und des Oberflözes (unten). (Aus Kothen 1997)

Die diversen Braunkohlenflöze und die Torfmoore aus denen sie entstanden sind, hatten in der Fläche unterschiedliche Ausdehnungen und zeichnen die strukturelle Entwicklung des Sedimentationsbeckens nach. Die synsedimentär aktiven Verwerfungen („Sprünge“) hatten einen wesentlichen Einfluss auf die ungleichförmige Absenkung der Niederrheinischen Bucht. Die Torfmoore waren daher vielfach durch tektonisch bedingte Geländestufen begrenzt, wie Abbildung 16 zeigt. In Abbildung 17 ist die Mächtigkeit der Braunkohlenflöze dargestellt.

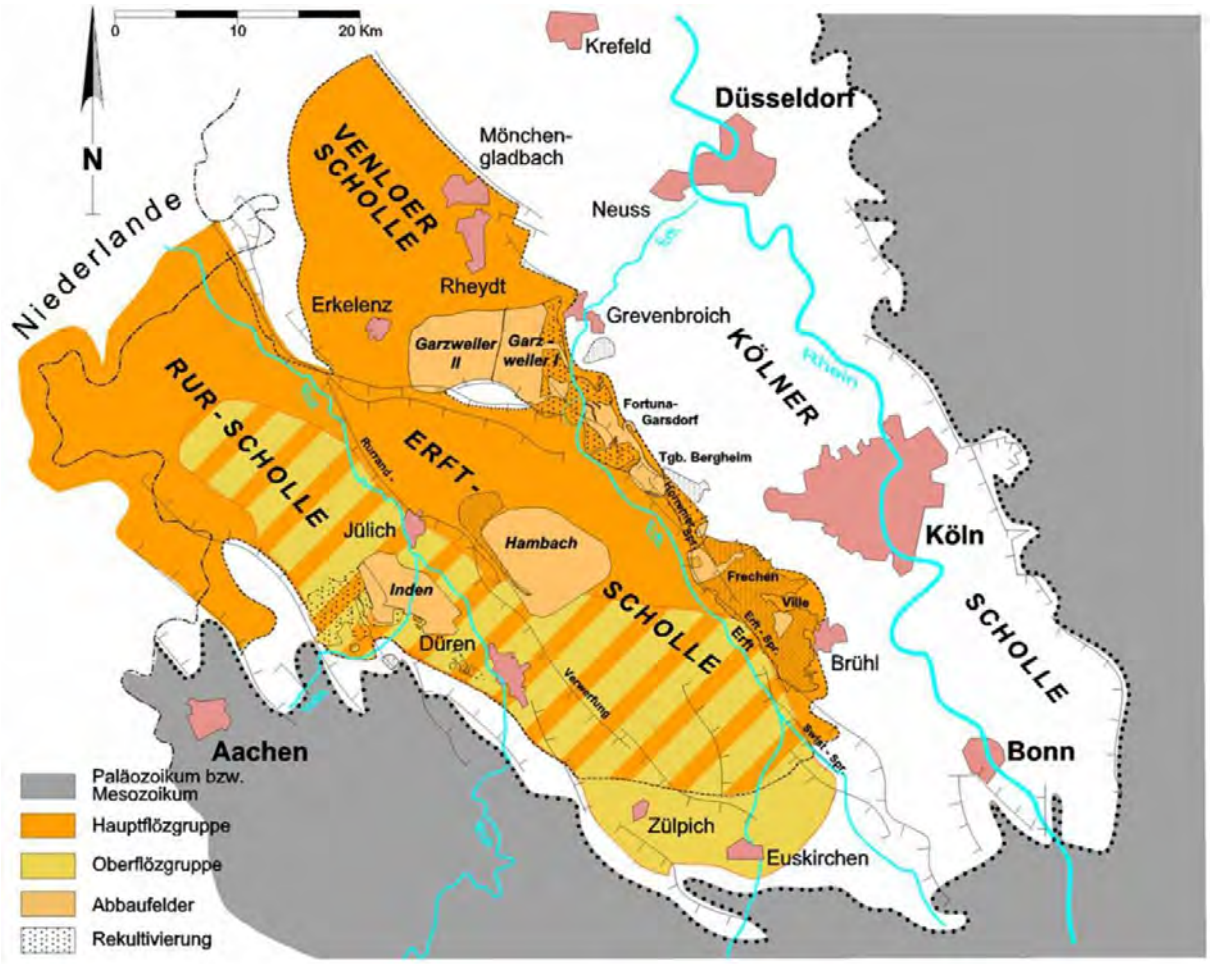


Abbildung 16 – Verbreitung der Hauptflöz-Gruppe und Oberflöz-Gruppe (nach Zimmermann 2010)

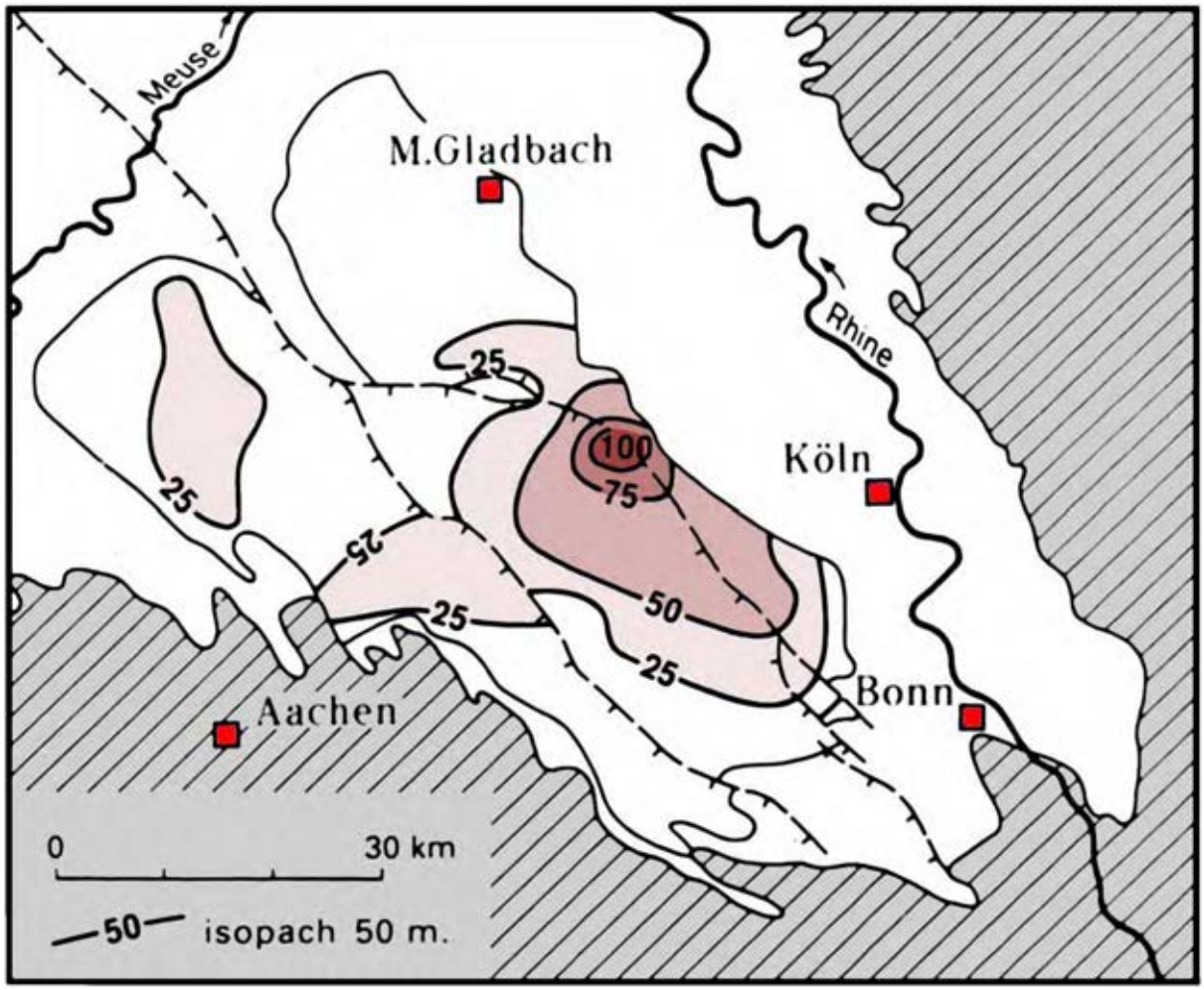
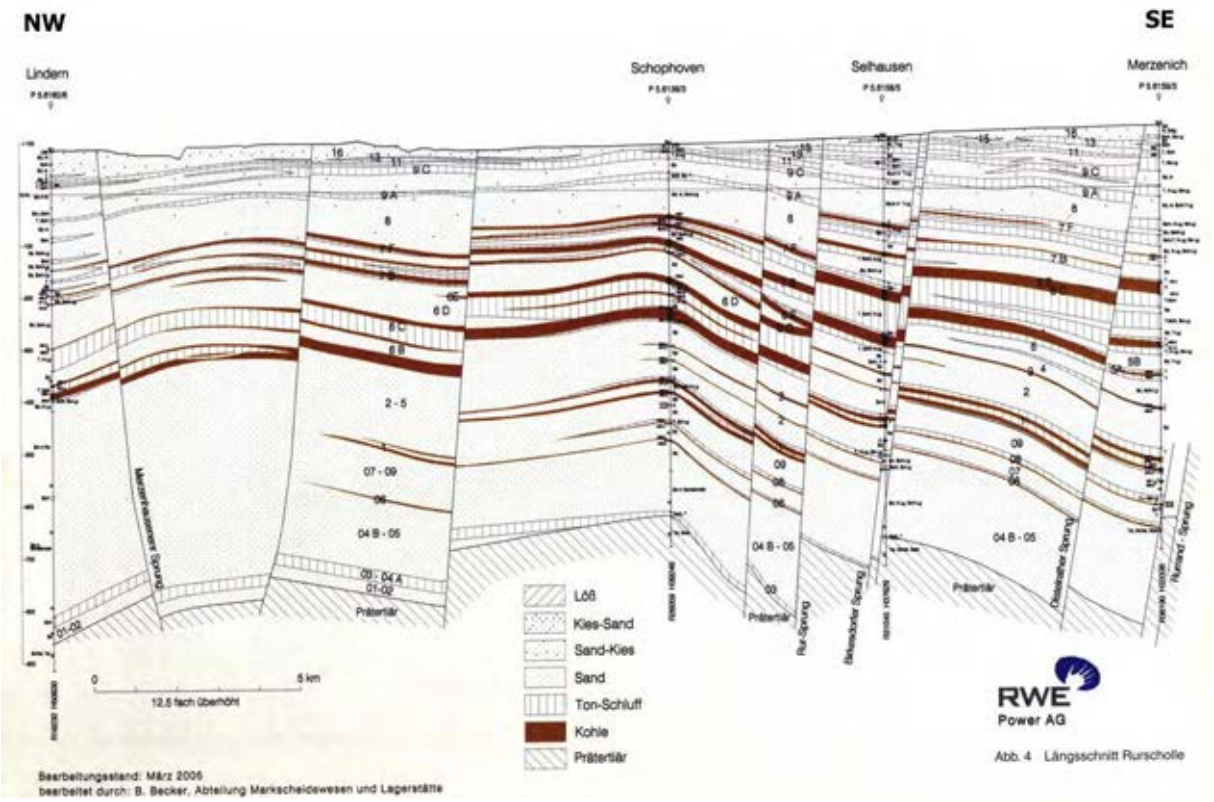


Abbildung 17 – Isopachendarstellung (Linien gleicher Mächtigkeit) der Braunkohleflöze. (Nach Hager 1986, aus NN 1997)

Die oben gezeigten stratigraphischen Tabellen sind stark schematisiert und vermitteln dadurch keinen realistischen Eindruck über die tatsächlichen Lagerungsverhältnisse. Näher an der Realität sind die aus Bohrungen konstruierten geologischen Profilschnitte der Abbildung 18, die hier beispielhaft gezeigt werden. Die Schnitte sind zwar stark überhöht, aber die Komplexität der tektonisch gestörten Abfolgen wird besser wiedergegeben.



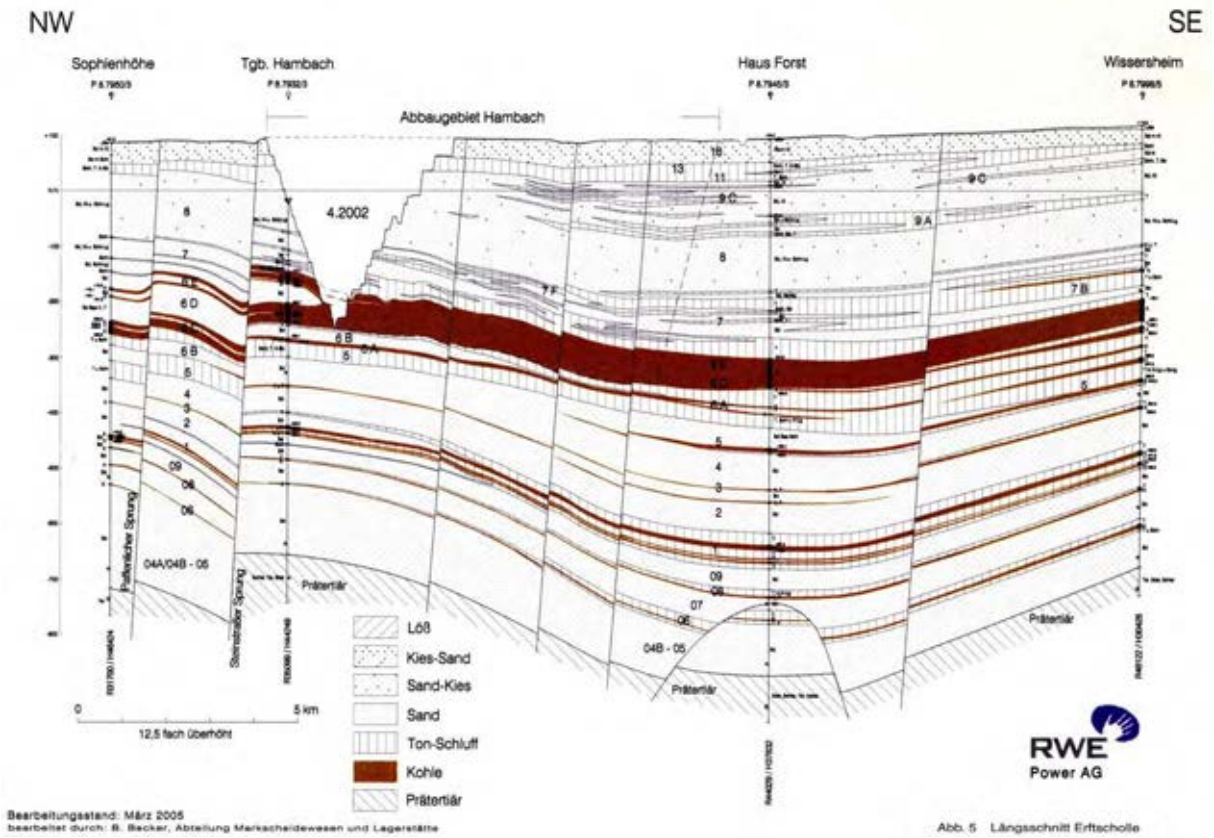


Abbildung 18 – Längsschnitte (12,5-fach überhöht) durch die Rur-Scholle (oben) und die Erft-Scholle (unten) zeigen über dem prä-tertiären Untergrund die Abfolgen aus Braunkohlen, Schluffen, Tonen und Sanden.

Quartär

Die stratigraphische Abfolge des späten Tertiärs und Quartärs ist in Abbildung 19 zusammengestellt und mit anderen Gebieten korreliert. In der Niederrheinischen Bucht ist die Grenze Tertiär/Quartär (Pliozän/Pleistozän) durch den klimatisch bedingten Rückzug des Meeres nach Norden und dem damit verbundenen Ende der marinen Sedimentation und der gleichzeitigen Zunahme massiver fluviatiler Ablagerungen aus dem Rheinischen Massiv markiert. Durch die tektonisch bedingten Schiefstellungen der tertiären Sedimentabfolgen und ihrer teilweisen Erosion nach dem Rückzug des Meeres sind Winkeldiskordanzen entstanden, an denen tertiäre Schichten ausstreichen und durch die quartären Deckschichten gekappt und überlagert sind.

Das Pleistozän ist durch einen Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten gekennzeichnet. In den Kaltzeiten lag der Meeresspiegel um teilweise mehr als 100 m unter dem heutigen Niveau. Weite Teile des heutigen Kontinentalschelfs waren trocken gefallen und die Flusstäler verfügten über ein hohes Gefälle. Die Wasserführung der Flüsse unterlag starken jahreszeitlichen Schwankungen, mit den höchsten Abflussmengen im Frühjahr zur Schneeschmelze. Die Flüsse waren dadurch in der Lage, große Sedimentmengen zu transportieren, was zur Ausprägung eines verwilderten Flusssystems führte (Seyfried und Leinfelder 2007; Wikipedia 2014b).

Die pleistozäne Abkühlung führte dazu, dass im Bereich des heutigen Rheinischen Braunkohlenreviers ein Periglazialklima herrschte (Klostermann 2010). In der Kältesteppe der Niederrheinischen Bucht konnten sich fortan nur noch Gräser und Kräuter halten, und in den Interglazialen kam es wegen extensiver Ablagerungen tonig-schluffiger Sedimente durch das Rhein-Maas-System nicht mehr zu substantiellen Moorbildungen (Zimmermann 2010). Lokale Torflinsen aus diesem Zeitabschnitt sind jedoch bekannt.

Parallel zum klimatisch bedingten Rückzug des Meeres dauerte die seit der Oligozän/Miozän-Wende (Ziegler und Dèzes 2005) erfolgende Heraushebung der Rheinischen Masse an. Für die letzten 800.000 Jahre wird eine Hebung des Rheinischen Schiefergebirges von bis zu 132 m berichtet (Wikipedia 2014b).

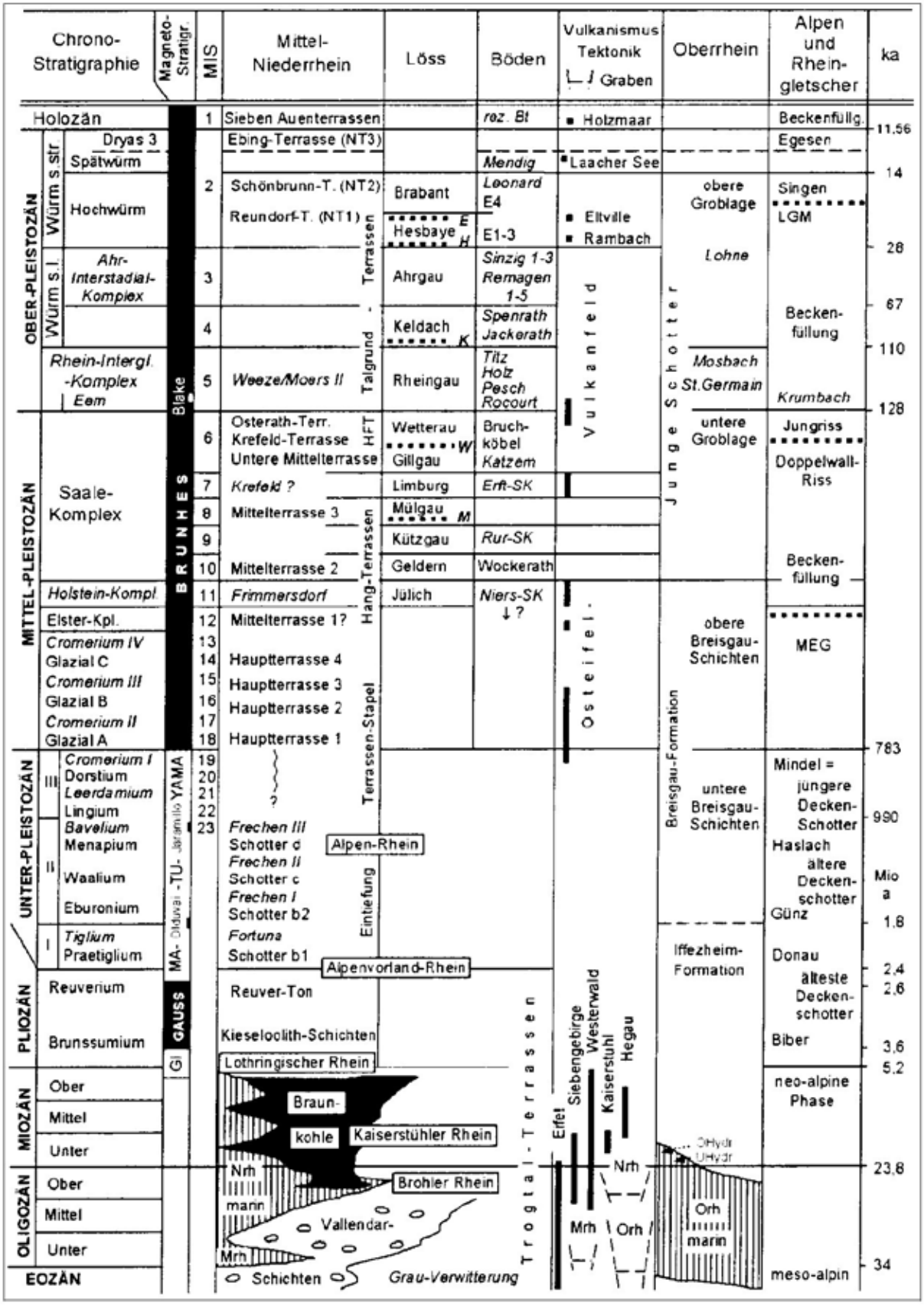


Abbildung 19 – Stratigraphische Gliederung des Quartärs (und Tertiärs) der Niederrheinischen Bucht. Aus Kels (2007)

Nach Klostermann (2010) war seit dem Altpleistozän die gesamte Niederrheinische Bucht von den Flusssystemen des Rheins und der Maas erfüllt. Aber auch von Westen her, aus dem Gebiet des heutigen Belgien, erfolgten Sedimentschüttungen durch mehrere Flüsse (Westerhoff et al. 2008). Dies hatte zur Folge, dass die gesamte niederrheinische Braunkohle-Provinz von mächtigen Kies- und Sandablagerungen überdeckt wurde. Siehe Abbildung 20.

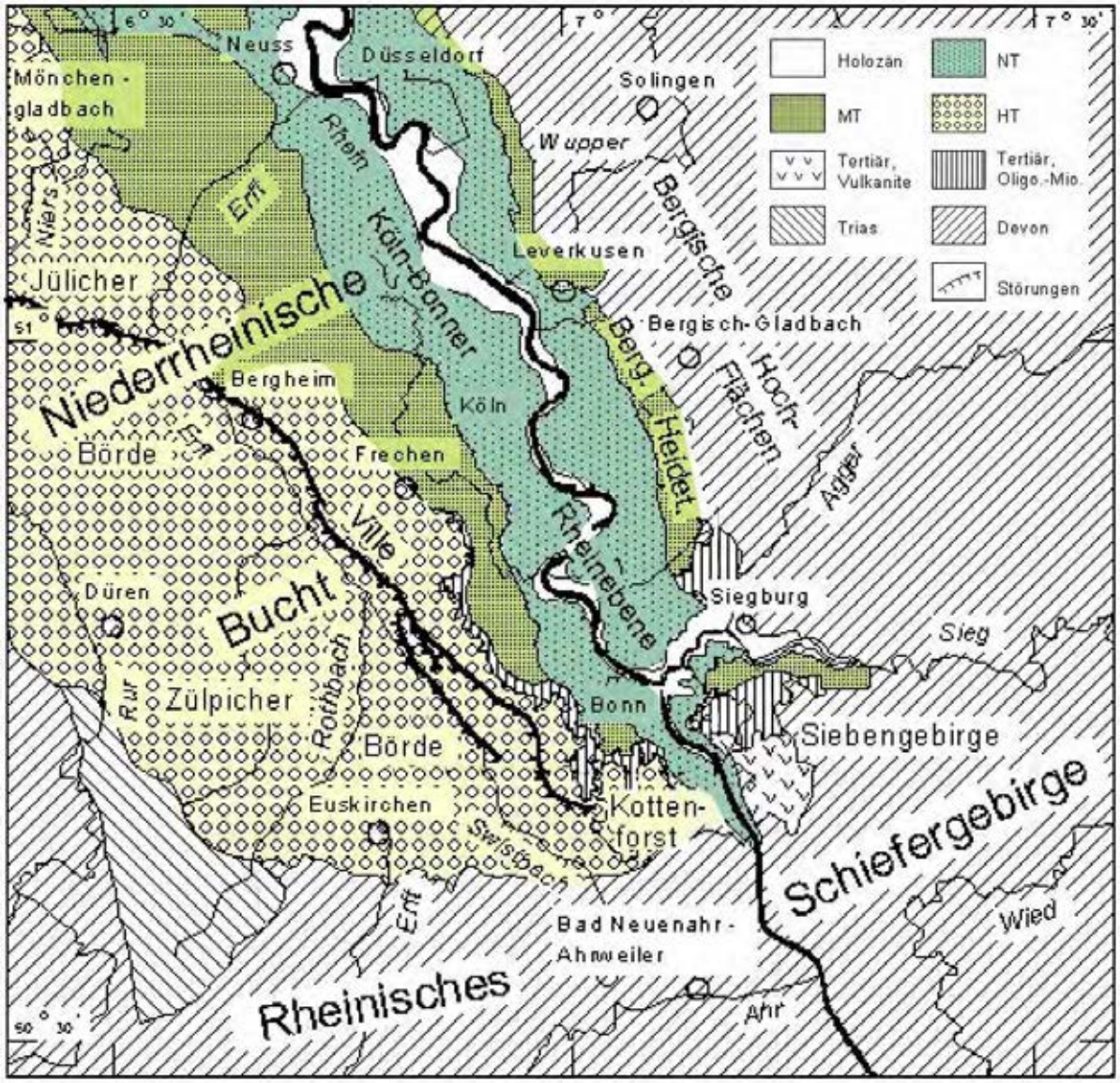


Abbildung 20 – Verbreitung der Hoch-, Mittel- und Niederterrassen in der Rheinischen Bucht (nach Yoo, 2008).

Nach Aufschotterung der unterpleistozänen Terrassenschotter verdrängte der Rhein durch seine Ablagerungen die Maas nach Westen und es kam zur Sedimentation der mächtigen Hauptterrassenfolge, mit den vier gestapelten Hauptterrassenkörpern, welche jeweils Wechseln zwischen Kalt- und Warmzeiten entsprechen (Kels 2007).

Durch die Hebung des Ville-Rückens wurde schließlich dem Rhein der Weg in den Westteil der Rheinischen Bucht versperrt, so dass der Fluss gezwungen war, sich in die Kölner Scholle

östlich der Ville einzutiefen (Vgl. Abbildung 20). In dieser Periode entstanden die Mittelterrassen, während die ausgedehnten Hauptterrassen des Rheins als Plateau-Landschaft zurück gelassen wurden. Dort lag von nun an eine weite Verebnungsfläche vor, auf der in den Kaltzeiten eine kräftige Lössakkumulation stattfinden konnte (Kels 2007), die mehrere Meter Dicke erreicht hat (Schulz 2007).

Während der jungpleistozänen Weichsel-Kaltzeit vor ca. 127.000 bis 10.500 Jahren schnitt sich der Rhein östlich der Ville weiter in die Schotterkörper der Haupt- und Mittelterrassen ein und schotterte die ältere und jüngere Niederterrasse auf (Wikipedia 2014b). Siehe Abbildung 21.

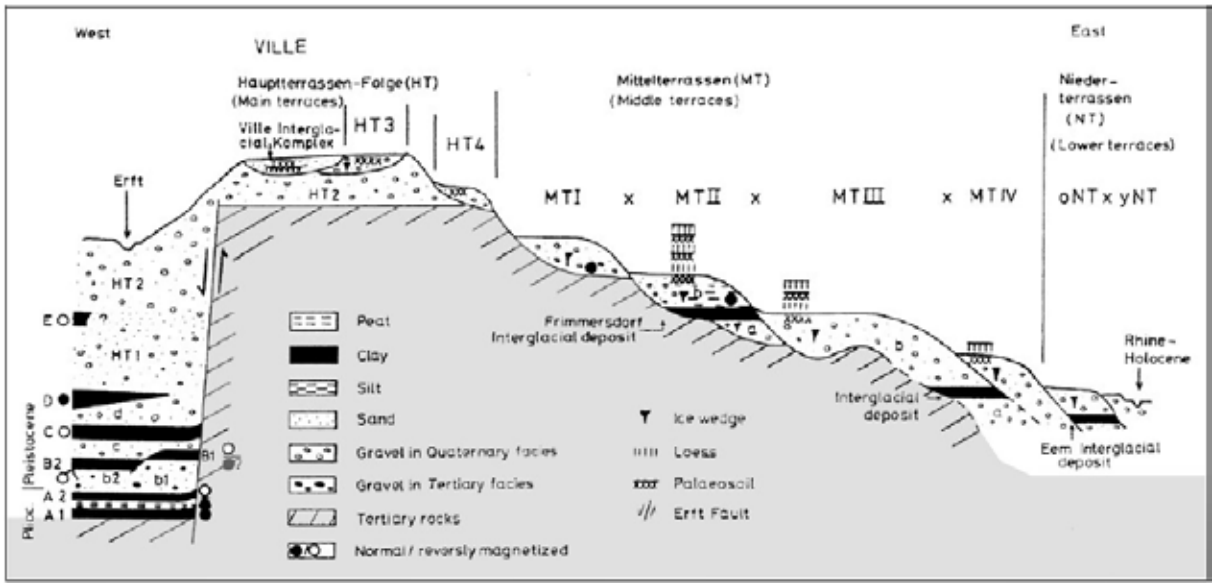


Abbildung 21 – Aufbau der Hoch-, Mittel- und Niederterrassen im Bereich der Kölner Bucht. (Nach Kels 2007)

In den Warmzeiten zwischen den Vereisungsperioden, und besonders seit der letzten Vereisung, ging die Sedimentfracht der Flüsse zurück und es konnten sich in Altarmen und Tümpeln des Rheins und der Maas und ihren Nebenflüssen (z.B. Niers) Moorlandschaften bilden. Die Bildung von Niedermooren wurde auch durch tektonisch absinkende Tallandschaften und damit ansteigende Grundwasserstände begünstigt, wie im Gebiet von Schwalm und Nette, wo während der Nacheiszeit mächtige Niedermoor-Torflager entstanden sind (Paas und Schalich 2005).

Zwischenfazit Stratigraphie

Aus der Untersuchung der stratigraphischen Abfolge und der Sedimentologie bleibt mit Blick auf die Fragestellung dieser Studie festzuhalten, dass außer den gewinnbaren Hauptflözen weitere geringmächtige Vorkommen von Braunkohlen bekannt sind, die eher als fleckenförmig verbreitete Einzelvorkommen mit unbekannter lateraler Erstreckung vorliegen. Hier sind insbesondere die stratigraphisch jüngeren, oberflächennahen und daher bei Sümpfungsmaßnahmen eher trockenfallenden Vorkommen im Pliozän (Vgl. Abbildung 13) von Interesse und im Hinblick auf differenzielle Bodensenkungen zu beachten.

Desgleichen müssen lokale Torf-Vorkommen in den quartären Deckschichten beachtet werden. Torf-Vorkommen sind besonders in den jüngeren Terrassen und den holozänen Talauen gebildet worden. In bodenkundlichen Kartenwerken sind im Arbeitsgebiet besonders im nördlichen Teil, etwa ab der Linie Grevenbroich – Heinsberg, zahlreiche Torfvorkommen ausgewiesen.

Braunkohlenbergbau

Deutschland hat aus seinen Braunkohlenlagerstätten im Rheinland, der Lausitz und in Mitteldeutschland 2012 gegenüber dem Vorjahr die heimische Förderung um 5 % ausgeweitet und war mit einem Anteil von 16,8 % (185,4 Mill. t) der größte Weichbraunkohleproduzent, vor China (13,1 %) und Russland (7,0 %) (BGR 2013).

Im Rheinland betrug der „geologische Vorrat“ an Braunkohle ursprünglich etwa 55.000 Mill. t und repräsentiert damit das größte geschlossene Braunkohlenvorkommen in Europa. Große Teile davon gelten als technisch und wirtschaftlich gewinnbar, doch stehen heute Klimaschutzgründe einer langfristigen Weiternutzung dieser Braunkohlenvorräte entgegen.

Die Förderung im Rheinland betrug 2013 rund 97 Mio. Tonnen (DEBRIV 2014).

Der noch gewinnbare Braunkohlenvorrat in den genehmigten Tagebauen Inden (I/II), Hambach und Garzweiler (I/II) beläuft sich auf rund 3.200 Mill. t, womit das heutige Förderniveau über einen Zeitraum von weiteren 30 Jahren aufrechterhalten werden könnte (DEBRIV 2013).

Nach DEBRIV (2013) wird im Rheinland eine 6 bis 18 Mio. Jahre alte miozäne Braunkohle abgebaut. Die Lagerstätten erstrecken sich über eine Fläche von 2.500 km² im Städtedreieck Köln, Aachen und Mönchengladbach (Abbildung 22).

Der Bergbau auf Braunkohle begann in größerem Umfang bereits vor über einem Jahrhundert in den oberflächennah anstehenden Braunkohlen entlang des Ville Höhenrückens (Südrevier, Mittleres Revier, Nordrevier) und auch im Westen durch den Tagebau „Zukunft“ (Westrevier). Diese Vorkommen sind heute weitgehend erschöpft und die letzte Grube in der Ville, der Tagebau Bergheim, wurde im Jahr 2002 stillgelegt und ist heute weitgehend rekultiviert. Abbildung 23 zeigt den Konsolidierungsprozess von vielen kleineren Braunkohletagebauen in den 1950er Jahren hin zu den drei heute noch aktiven Großtagebauen.

Aktiver Braunkohlenbergbau findet heute noch in den Großtagebauen Inden, Hambach und Garzweiler statt, die seit Ende der 1970er / Anfang der 1980er Jahre auf mächtige, aber tiefer lagernde Braunkohleflöze bauen. Die großräumigen Sümpfungsmaßnahmen dazu laufen seit Mitte der 1950er / Anfang der 1960er Jahre (Ziegler 2010). Demgegenüber soll der Grundwasserwiederanstieg im Südrevier weitgehend abgeschlossen sein (Bucher 2012; Leuchs 2013).

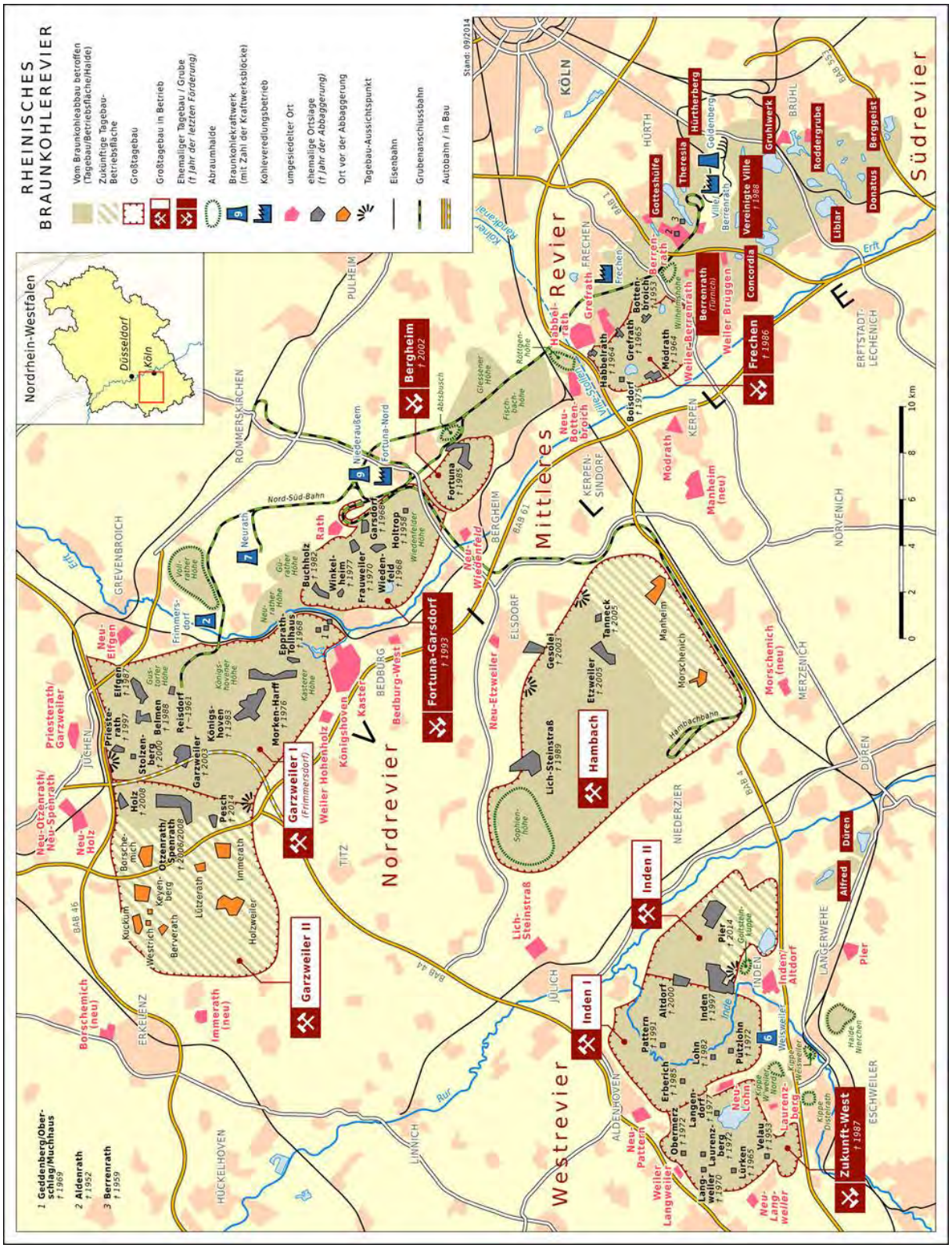


Abbildung 22 – Rheinisches Braunkohlenrevier (Wikipedia 2014)

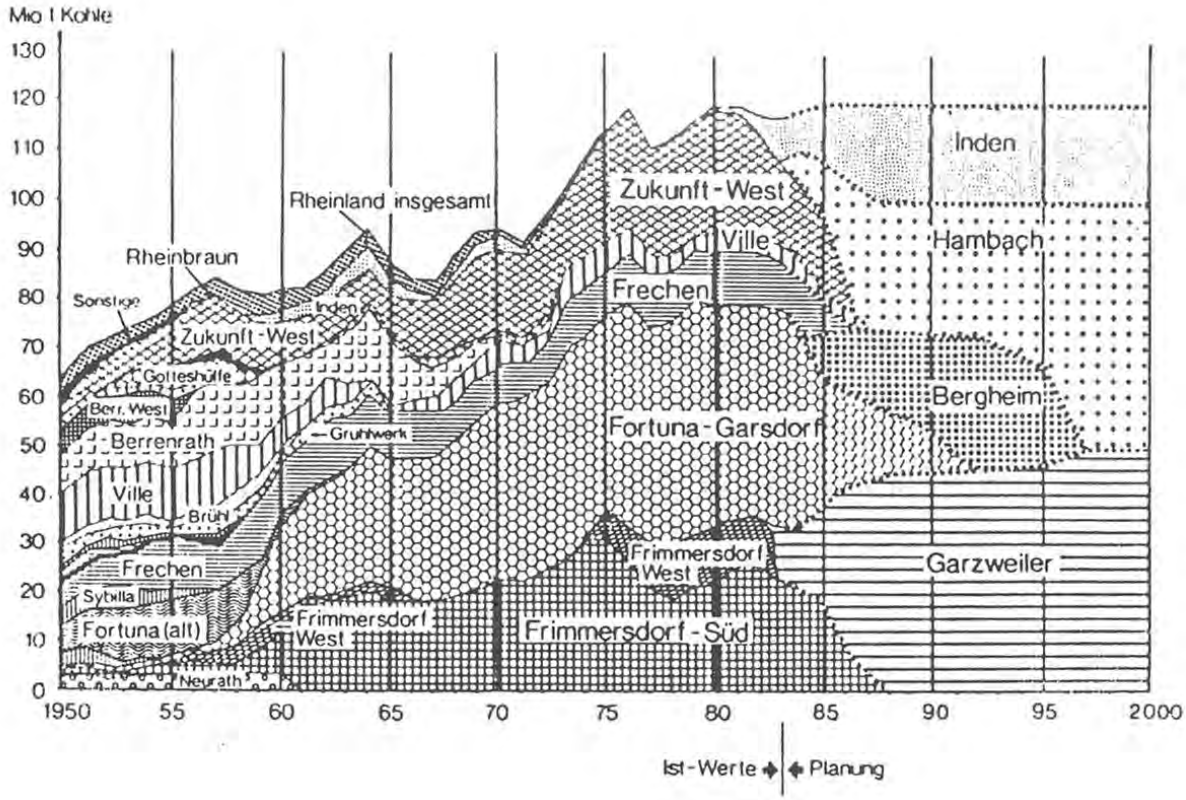


Abbildung 23 – Historische Entwicklung der Braunkohlenförderung im Rheinland. (NN 1987)

Tagebau Inden

Der Tagebau Inden wird seit 1981 aufgeschlossen und grenzt im Westen an das frühere Abbaufeld Zukunft-West (1935-1987) an. Das Abbauende im Tagebau Inden II soll nach derzeitigen Planungen etwa 2030 erreicht sein. Nach Beendigung der Braunkohlengewinnung soll nach einem neueren Beschluss des Braunkohlenauschusses aus dem Jahr 2008 aus dem gefluteten und rekultivierten Restloch der 11 km² große und bis 180 m tiefe „Inde-See“ entstehen, mit einem Zielpegel von +92m NHN. Die Flutung soll im Wesentlichen durch Wasser aus der Rur erfolgen und bis ca. 2060 / 2070 abgeschlossen sein (RWE 2014; NRW 2010).

Die beiden genehmigten Abschnitte Inden I und II nehmen zusammen eine Abbaufläche von 47 km² ein, bei Abbautiefen von 190 m am Nordrand bei Jülich/Kirchberg und bis 230 m am Ostrand bei Schophoven. Aufgeschlossen sind die Flöze Frimmersdorf-b und Garzweiler der Hauptflözgruppe, sowie die Flöze Friesheim, Kirchberg und Schophoven der Oberflözgruppe. Die gewinnbaren Flöze haben eine kombinierte Mächtigkeit bis ca. 45 m und einen Kohleinhalt von 510 Mill. t. Die Jahresförderung von 22 Millionen Tonnen Braunkohle dient ausschließlich der Versorgung des Kraftwerks Weisweiler, die Abraumbewegung liegt bei 80 bis 85 Mill. t/a, das (damit inkonsistente) Abraum-Kohle-Verhältnis soll bei 3,1:1 liegen (LANUV 2007; Wikipedia 2014c).

Tektonisch und hydrogeologisch liegt der Tagebau Inden in der Rur-Scholle.

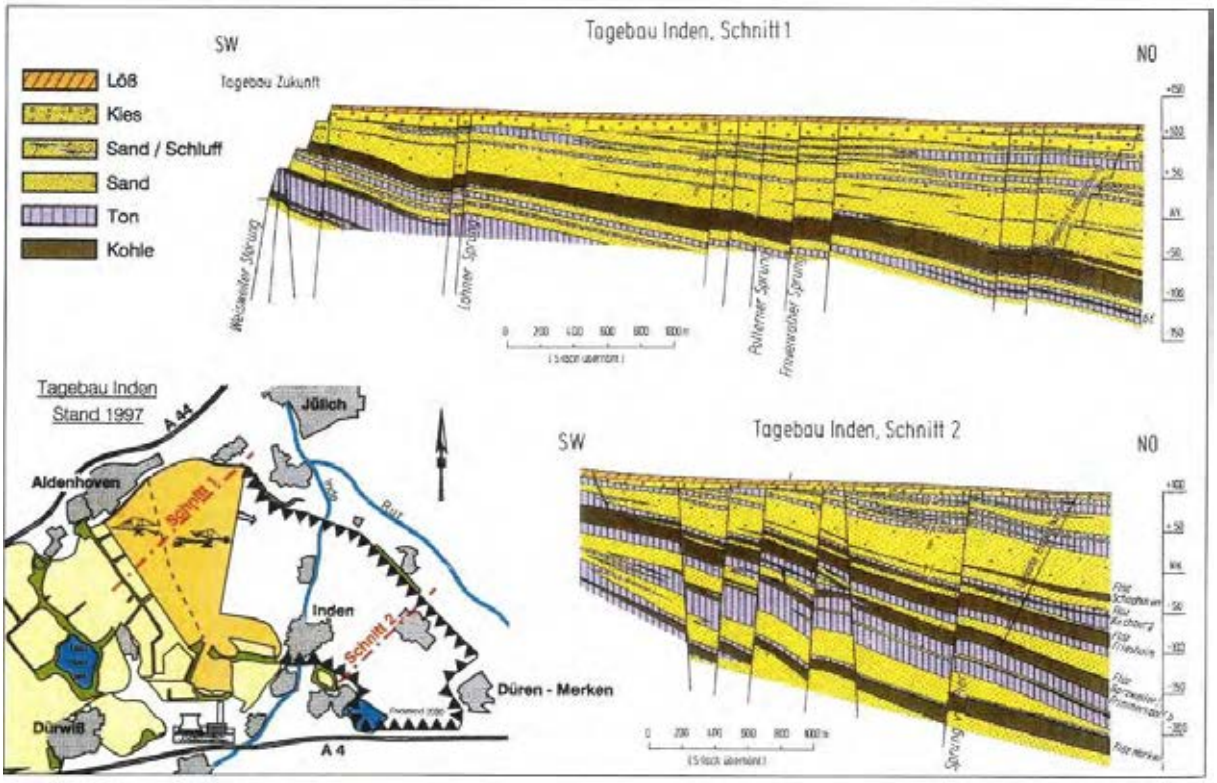


Abbildung 24 – Geologische Schnitte (überhöht) durch den Tagebau Inden. (Aus Gärtner und Durchholz 1998)

Tagebau Hambach

Der Tagebau Hambach wird seit 1978 aufgeschlossen und hat ein projektiertes Betriebsende im Jahr 2045. Die maximale Abbautiefe von -370m NHN bzw. 465 m unter Gelände soll gegen 2030 erreicht werden (RWE 2011). Die als „Sophienhöhe“ bekannte Außenkippe überragt das Gelände um 200 m. Nach Ende der Braunkohlengewinnung soll bis ca. 2060 aus dem Restloch durch Überleitung von 270 Mill. m³/a Rheinwasser ein See mit einer Fläche von 42 km², einer Tiefe bis 400 m, einem Volumen von 3,6 km³ (?) (Wikipedia 2014d) und einem Zielpegel von +65m NHN entstehen. Der Hambach-See würde dann der tiefste und bezüglich des Volumens der zweitgrößte See Deutschlands nach dem Bodensee sein (BezReg Köln 2009; Kosma 2012; RWE 2011; RWE 2014; Wikipedia 2014d).

Im Tagebau Hambach lagerten unter der genehmigten Abbaufläche von 85 km² anfangs rund 2.500 Mill. Tonnen Braunkohle unter 15.400 Mill. Tonnen Abraum (Abraum-Kohle-Verhältnis 6,2:1). Die Mächtigkeit der Deckschichten nimmt von 150 m im Westen auf 400 m im Osten zu. Im Norden und Westen ist die Lagerstätte in die Teilflöze Garzweiler, Frimmersdorf-b und Frimmersdorf-a aufgespalten, im östlichen Feldesteil hingegen kompakt (Hauptflöz, Vgl. Abbildungen 11 und 13). Die kombinierte Mächtigkeit der Braunkohleflöze beträgt bis zu 70 m. Die jährlich geförderte Kohlemenge von 25 bis 32 Mill. Tonnen versorgt die Kraftwerke Niederaußem, Neurath, Frimmersdorf und Knapsacker Hügel (Hempel und Kulick 2003; RWE 2011, 2014; Wikipedia 2014d).

Tektonisch und hydrogeologisch liegt der Tagebau Hambach in der Erft-Scholle.

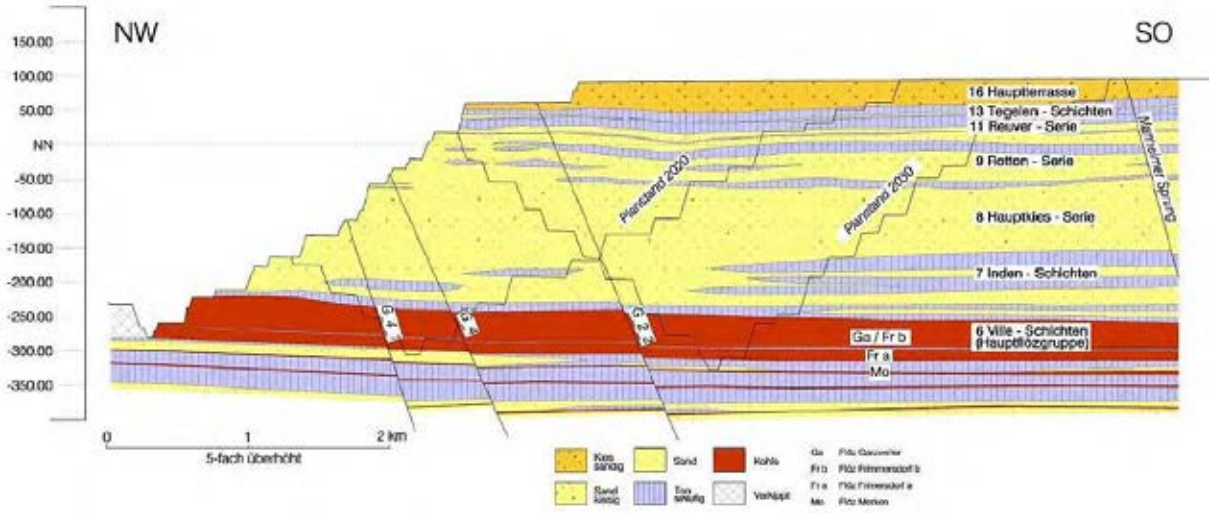


Abbildung 25 – Geologischer Längsschnitt (überhöht) durch den Tagebau Hambach. (RWE 2011)

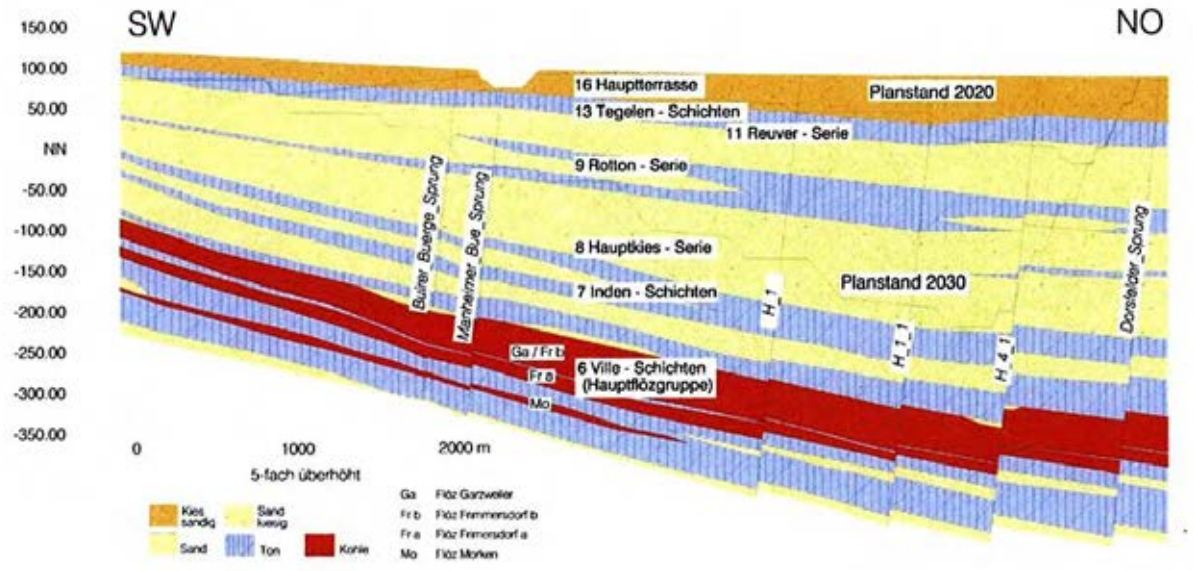


Abbildung 26 – Geologischer Querschnitt (überhöht) durch den Tagebau Hambach. (RWE 2011)

Tagebau Garzweiler

Der Großtagebau Garzweiler liegt westlich von Grevenbroich und besteht aus dem älteren Tagebau Garzweiler I, der 1983 durch den Zusammenschluss der Abbaufelder Frimmersdorf-Süd sowie Frimmersdorf-West entstanden war, sowie seit 2006 dem neueren westlichen Anschluss-Tagebau Garzweiler II. Das Abbaufeld Garzweiler I nimmt eine Fläche von 56 km² ein, die ursprünglich für das Feld Garzweiler II vorgesehene Abbaufläche von 68 km² wurde nachträglich auf 48 km² verkleinert. Nach einer Entscheidung der nordrheinwestfälischen Landesregiereng soll der Tagebau nochmals um etwa ein Viertel verkleinert werden (Aachener Zeitung 2014). Das Ende der Kohleförderung ist für das Jahr 2045 vorgesehen. Danach soll durch eine jährliche Überleitung von ca. 60 Mill. m³ Rheinwasser über etwa 30 Jahre ein 23 km² großer und bis 180 m tiefer See entstehen, mit einem Zielpegel von +65m NHN. Auch danach muss der Wasserhaushalt bis zum Wiederanstieg des Grundwasserspiegels in der Umgebung für weitere 25 Jahre (also bis ca. 2100) gestützt werden (Leuchs 2013; Levacher 2009; NRW 2010; RWE 2014; Wikipedia 2014e).

Im Tagebau Garzweiler werden die Flöze Morken I, Frimmersdorf und Garzweiler abgebaut, die eine kombinierte Mächtigkeit von 40 m aufweisen und von 40 bis 210 m Abraumschichten überdeckt sind. Das Abbaufeld Garzweiler II beinhaltet Reserven von 1,3 Milliarden Tonnen, bei einem Abraum-Kohle-Verhältnis von 4,4:1. Die jährliche Fördermenge von 35 bis 40 Mill. Tonnen dient der Versorgung der Kraftwerke Frimmersdorf und Neurath.

Tektonisch und hydrogeologisch liegt der Tagebau Garzweiler in der Venloer-Scholle und grenzt im Südwesten im Bereich des Jackerather Horstes an die Erft-Scholle.

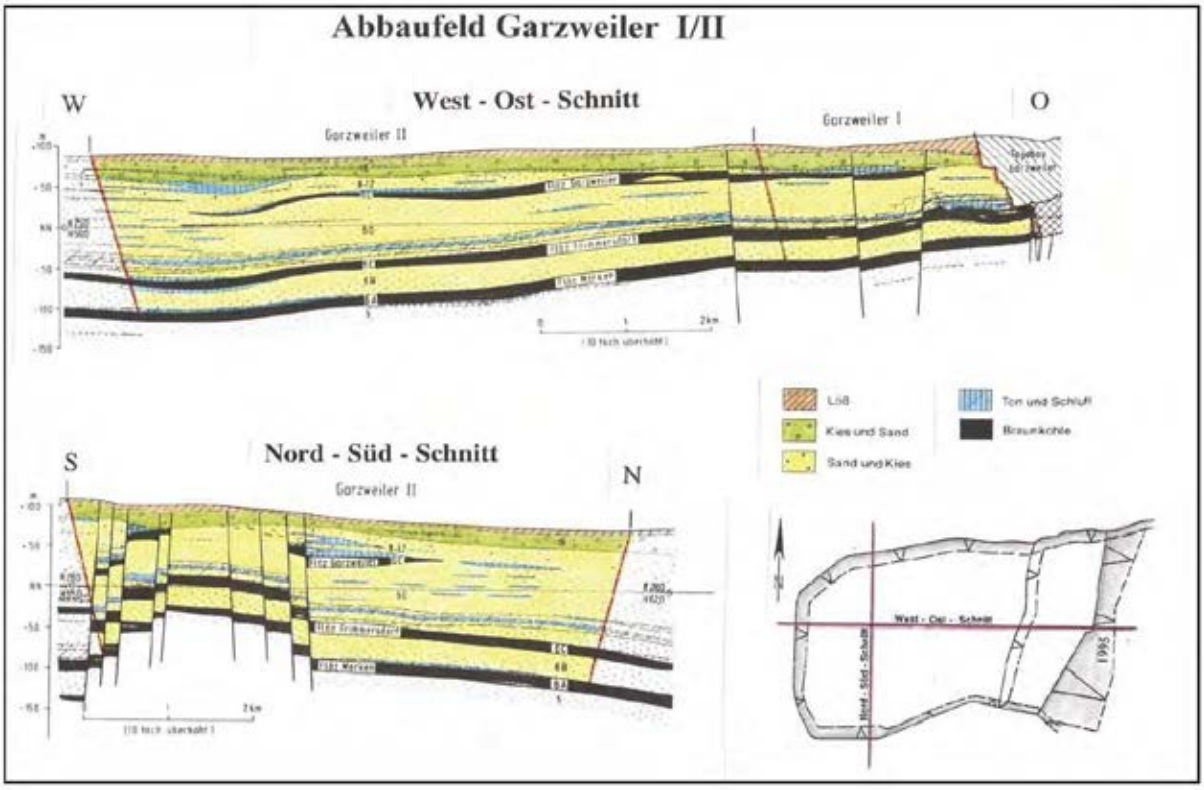


Abbildung 27 – Geologische Schnitte (überhöht) durch den Tagebau Garzweiler.
(Aus Niemann-Delius et al. 2011)

Zwischenfazit Braunkohle-Tagebaue

In den frühen, heute weitgehend rekultivierten Tagebauen entlang der Ville waren die Abbautiefen geringer und damit die Grundwasserabsenkungen weniger gravierend. Letzteres gilt auch für die Tagebaue Zukunft-West und Inden I. Mit dem 360 m tiefen Tagebau Fortuna-Garsdorf drang man erstmals deutlich weiter in den Untergrund ein. Großräumige und tiefreichende Grundwasserabsenkungen werden besonders durch die Sümpfungsmaßnahmen des Tagebaus Hambach seit Mitte der 1970er Jahre verursacht.

Zu den derzeit geltenden Terminplanungen für das Ende der Kohleförderung und die Flutung der Tagebaue siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 – Flutungszeiträume einiger Tagebaue (Jahreszahlen)				
	BK-Förderung	Zielerreichung See-Pegel	Stationärer Endzustand GW	Quelle
Inden	- 2030 - 2030 - 2032	2060		Leuchs 2013 NRW 2010 LANUV 2007
Hambach	- 2045 - 2045 - 2040	2100 2060		Leuchs 2013 NRW 2010 LANUV 2007
Garzweiler	- 2045 - 2045 - 2045	2085	2100	Leuchs 2013 NRW 2010 LANUV 2007
Zukunft-West (Blausteinsee)	1935 - 1987	2005 erreicht	nein	LANUV 2007 Bucher 2012

Durch die zeitliche Staffelung der Grundwasser-Wiederanstiege und der ungleichmäßigen Wiederbelastung der jeweiligen tektonischen Schollen werden instationäre boden- bzw. gebirgsmechanische Zustände durchlaufen, die hinsichtlich differenzieller Bodensenkungen wie auch der möglichen Auslösung seismischer Ereignisse bewertet werden müssten.

Weiterhin wird darauf zu achten sein, dass es im Bereich der Restloch-Sohlen während des Wiederanstiegs des Grundwasserdrucks in den Liegend-Grundwasserleitern nicht zu Verletzungen der Sicherheitskriterien für einen hydraulischen Grundbruch kommen kann. Im 3. Rahmenbetriebsplan für den Tagebau Hambach wird zwar die Absicht erklärt, bestimmte Brunnen auch während der Flutungsphase weiter zu betreiben, doch dient dies lediglich der Sicherstellung einer vom Seekörper in Richtung unverritztes Nebengebirge orientierten Grundwasserströmung. Demgegenüber wurden keine Hinweise auf eine Kontrolle der Grundwasserspannung in den Liegend-Grundwasserleitern während der Tagebauflutung gefunden.

Die räumliche und zeitliche Entwicklung der bodenmechanischen Zustände hängt von den Flutungs-Zeiträumen und -Verläufen und deren wechselseitigen Beeinflussungen ab. Letztere beruhen maßgeblich auf politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen, die aus heutiger Sicht noch nicht abschließend feststehen. Modellrechnungen können daher Prognosen immer nur auf Grundlage von politisch-wirtschaftlichen Szenarien errechnen.

Hydrogeologie

Die hydrogeologischen Verhältnisse in der Niederrheinischen Bucht werden einerseits durch die Hydrostratigraphie der tertiären und quartären Sedimente bestimmt, andererseits durch die tektonische Gliederung in Großschollen. Die schollentrennenden Störungen waren bereits synsedimentär aktiv und hatten Einfluss auf die lokale Schichtabfolge und Faziesentwicklung. Sie sind aber auch selbst hydraulisch aktiv, können also je nach Ausbildung lateral grundwasserstauend wirken oder vertikal Grundwasserstockwerke miteinander verbinden (Knufinke und Kothen 1997).

Durch die umgebenden Mittelgebirge ist ein seitlicher Grundwasserzustrom in die Lockergesteine der Niederrheinischen Bucht vorhanden, die aber aufgrund ihrer großen Ausdehnung selbst den größten Anteil an der Grundwasserneubildung hat. Die Niederrheinische Bucht wird oberirdisch von zahlreichen Vorflutern entwässert, die letztlich hauptsächlich über die Rur, die Niers und die Schwalm der Maas im Westen, oder über die Erft dem Rhein im Osten als Hauptvorfluter zuströmen.

Die von diesen hydrogeologischen Voraussetzungen bestimmten natürlichen Grundwasserbewegungen werden bereits seit den 1950er Jahren, und auch noch bis ins kommende 22. Jahrhundert hinein, durch die Sümpfungsmaßnahmen für die Braunkohlentagebaue und die anschließende Wiederauffüllung der Grundwasserleiter in profunder Weise verändert. Während dieser Zeitspanne herrschen keine stationären Strömungsgleichgewichte, sondern höchst instationäre, transiente Zustände, die bei allen Überlegungen zu berücksichtigen sind. (Bei stationären Systemen bleiben alle Zuflüsse und Abflüsse und das im System gespeicherte Wasservolumen räumlich und zeitlich (näherungsweise) konstant, also „im Gleichgewicht“. Dies gilt in der Regel für unbeeinflusste Grundwassersysteme. Bei instationären Systemen verändern sich das im System gespeicherte Wasservolumen und die Zuflüsse und/oder Abflüsse räumlich und/oder zeitlich. Auch das System selbst kann sich ändern, beispielsweise durch bergbauliche Veränderungen der Aquifere und Aquitarde in Tagebauen und Kippen.)

Hydrostratigraphie

Die heute gebräuchliche hydrostratigraphische Gliederung in Grundwasser-Horizonte mit von unten nach oben zugeordneten Ziffern/Buchstaben-Codes von 01 bis 20 geht auf Schneider und Thiele (1965) zurück und ist im linken Teil der nachfolgenden Abbildung 28 wieder gegeben. Der rechte Teil der Abbildung 28 zeigt die regional teilweise eigenständige Faziesentwicklung aufgrund der oben beschriebenen wechselhaften marinen über brackische bis fluviatile Ablagerungsbedingungen in den einzelnen Großschollen.

Mit Ausnahme des obersten Grundwasserleiters mit frei beweglichem Grundwasserspiegel liegen für alle anderen Grundwasserleiter ursprünglich gespannte Verhältnisse vor (Ziegler 2010). Die Basis des aus tertiären und quartären Sedimenten bestehenden Aquifersystems wird von den geringleitenden Festgesteinen des Paläozoikums und Mesozoikums gebildet (Oswald 2007).

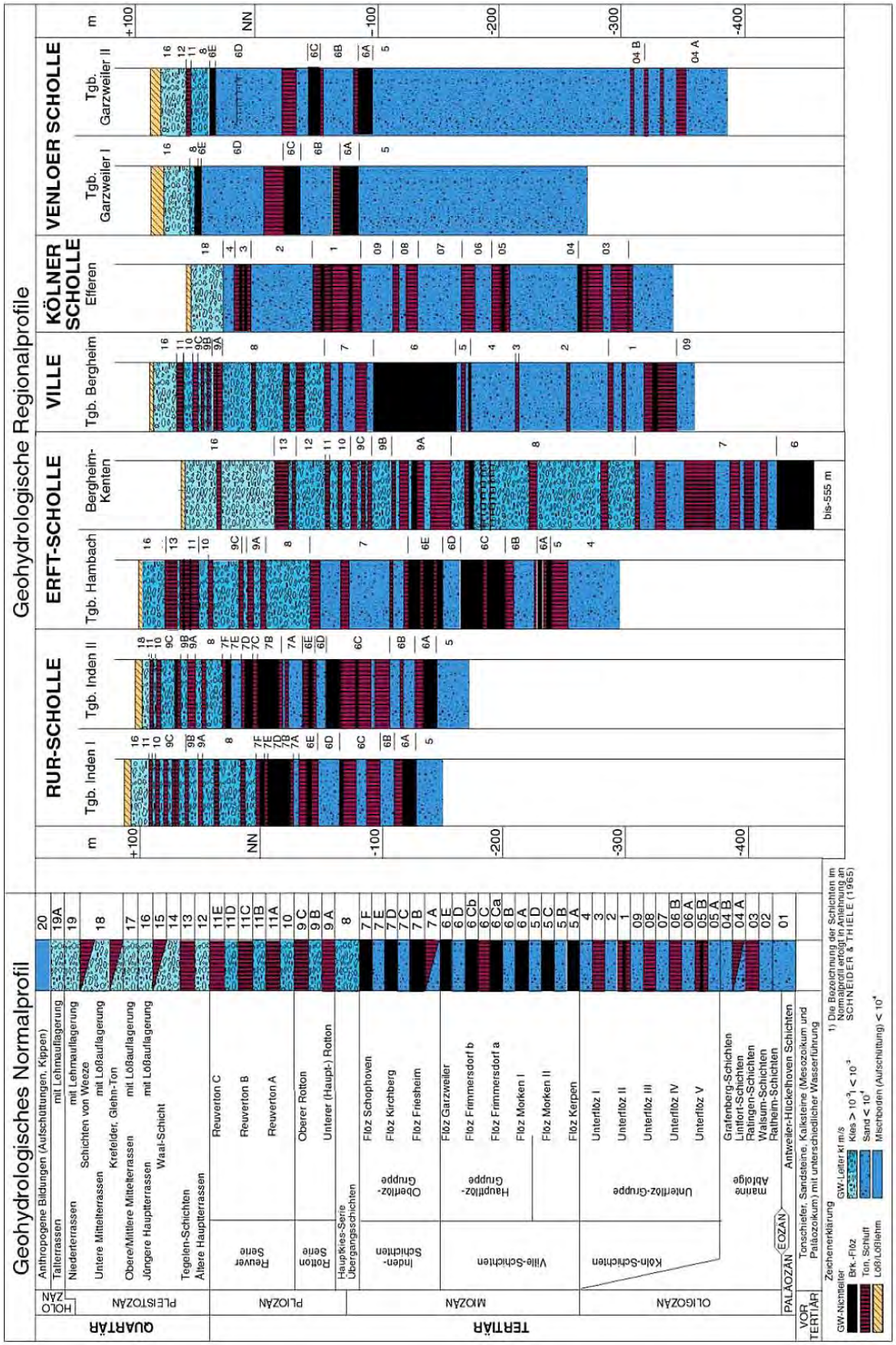


Abbildung 28 – Hydrostratigraphische Gliederung in den tektonischen Großschollen. (Nach RWE 2011)

Die von den Grundwasser-Horizonten zu unterscheidenden Grundwasserstockwerke (Grundwasserleiter; GWL) werden von oben nach unten nummeriert und sind im Arbeitsgebiet stratigraphisch nicht überall identisch, wie die Abbildung 29 schematisch zeigt. In den verschiedenen hydrogeologischen Teilräumen bestimmt vielmehr die Verbreitung grundwasserstauender Tonhorizonte und Braunkohlenflöze den Aufbau der Grundwasserstockwerke. Die in Abbildung 29 dargestellte Zuordnung der Horizonte zu Grundwasserstockwerken findet auch in den numerischen Grundwassermodellen von RWE Anwendung (Ziegler 2010). Andere Autoren fassen die einzelnen Grundwasserhorizonte aber teilweise in weniger Stockwerke (Grundwasserleiter; GWL) zusammen. Eine relativ ausführliche Darstellung der hydrostratigraphischen und hydrogeologischen Verhältnisse findet sich in der Dissertation von Giese (2010), auf die hier verwiesen werden kann.

Durch weiträumig verbreitete und undurchlässige Ton- und Braunkohlenhorizonte werden die verschiedenen Grundwasserstockwerke voneinander getrennt. Insbesondere das Hauptflöz (Horizont 6) trennt die Lockersedimente in ein Hangend- und ein Liegend-System. Der ebenfalls abdichtende Reuver-Ton (Horizont 11) ist fast über die gesamte Erft-Scholle und Rur-Scholle verbreitet, streicht aber in den südlichen Randbereichen der Schollen aus. Neben wenigen natürlichen hydrogeologischen Fenstern in diesen Grundwasserstauern werden jedoch zukünftig die verkippten Tagebaue und die Restseen sehr effektive vertikale Durchlässe bilden (Giese 2010).

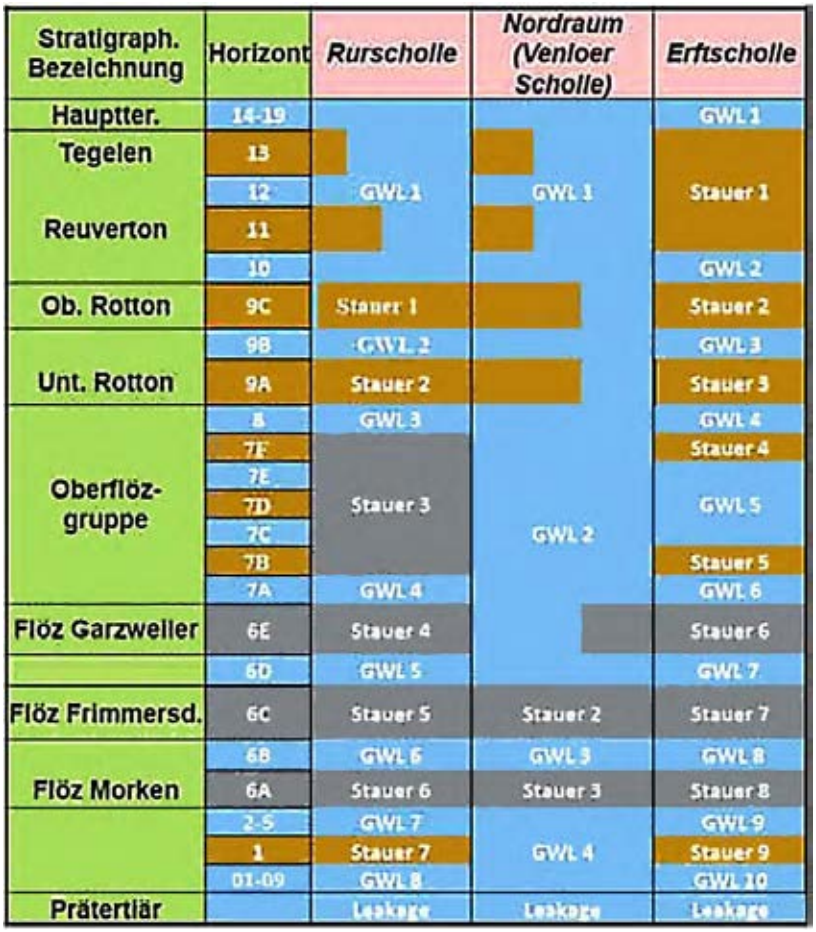


Abbildung 29 – Zuordnung der Grundwasserleiter in den verschiedenen hydrogeologischen Teilräumen zum geohydrologischen Normalprofil nach Schneider und Thiele (1965).

Hydrogeologische Teilräume und Tektonik

Durch die Rift-Tektonik sind zwischen den Hauptverwerfungen mehrere Großschollen entstanden (Abbildung 30), die zugleich als eigenständige hydrogeologische Teilräume beschrieben werden, da die Verwerfungen vielerorts abdichtend gegenüber Grundwasserströmungen wirken.

Im Arbeitsgebiet sind dies im Südwesten die Rurscholle mit den Tagebauen Zukunft-West und Inden, in der südlichen Mitte die Erftscholle mit dem Tagebau Hambach, und im Nordosten die Venloer bzw. Kölner Scholle, die als tektonische Einheit zu sehen sind, aber hydrogeologisch oft getrennt betrachtet werden. Die alten Tagebaue des Ville-Höhenrückens liegen entlang der SW-Begrenzung der Kölner Scholle, während sich der Tagebau Garzweiler am Südrand der Venloer Scholle befindet.

An den Hauptverwerfungen können die Schichtversätze bis zu 300 m betragen. Die größten tektonisch bedingten Einsenkungen, Braunkohle- und Aquifer-Mächtigkeiten finden sich in der Erftscholle (Vgl. Abbildungen 3 und 4).

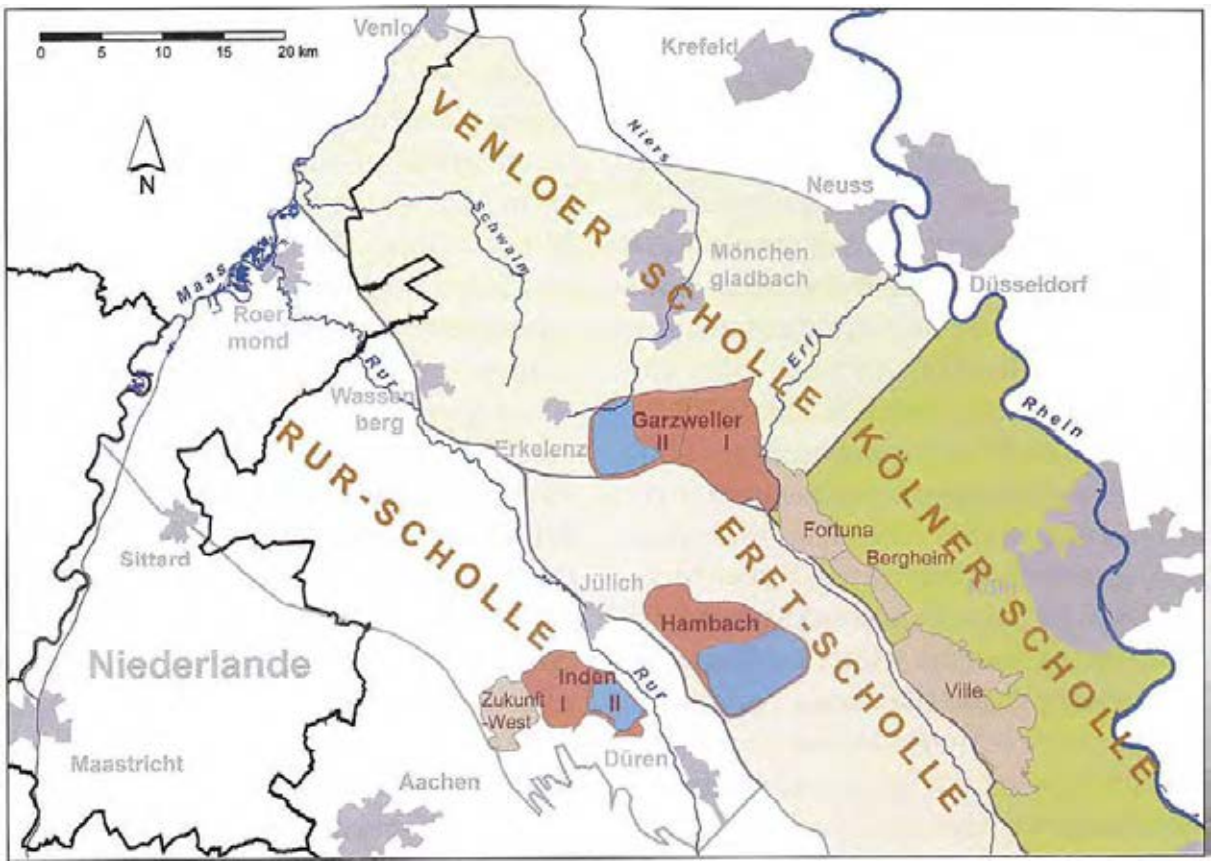


Abbildung 30 - Hydrogeologische Teilräume (Aus Cremer & Hüsener 2009)

Zwischenfazit Hydrogeologie:

Die Hauptverwerfungen und die durch sie begründete Aufteilung der Niederrheinischen Bucht in Großschollen und mit diesen kongruenten hydrogeologischen Teilräumen (Abbildung 30) spielen bei Betrachtungen der Grundwasserströmungen, Grundwasserstände und Grundwasserbilanzen und insbesondere bei der Berechnung numerischer Grundwassermodelle seit jeher eine zentrale Rolle. Diese lange Zeit postulierte und kaum hinterfragte hydraulische Trennung in Großschollen ist aber in der Realität in dieser Absolutheit nicht zu erwarten. Andererseits sind offenbar auch Störungen innerhalb der Großschollen hydraulisch aktiv.

Untersuchungen an zahlreichen aufgeschlossenen Störungen (Knufinke und Kothen 1997) haben ergeben, dass in den Störungszonen ausschließlich Material angetroffen wird, das innerhalb des Versetzungsbetrages in ihrer Nachbarschaft ansteht. Die Störungszonen sind wenige Dezimeter, selten bis 5 Meter dick. Diese Befunde lassen eher den Schluss zu, dass die Störungsflächen oder Störungszonen aufgrund ihrer Konstitution und Struktur für das Grundwasser keine wesentlichen Strömungswiderstände darstellen, zumindest nicht überall. Sie können sowohl vertikal wie auch lateral eine Verbindung zwischen den angeschnittenen Grundwasserstockwerken bilden.

Hydraulische Verbindungen über Störungen hinweg bestehen auch im Bereich von Staffelrampen (s.o.).

Auch die Untersuchungen zur Kopplung numerischer Grundwassermodelle benachbarter Großschollen (Becker et al. 2008) haben ergeben, dass teilweise erhebliche Randüberströmungen zur Nachbarscholle stattfinden.

Die Tagebaue verändern die hydrogeologischen Verhältnisse gegenüber der vorbergbaulichen Situation grundlegend. Sie durchbrechen sowohl vertikal die hydrostratigraphischen Stockwerkstrennungen als auch lateral hydraulisch wirksame Störungen. Dies wird sich auf die zukünftigen nachbergbaulichen Grundwasserströmungen in Form eines veränderten Strömungsregimes auswirken.

Die grundwasserstauenden Tonhorizonte (Tegelenschichten, Reuver-Ton, Rottone) weit im Hangenden der braunkohlenführenden Schichten haben bis zur Wiederherstellung naturähnlicher Grundwasserverhältnisse eine große Bedeutung für den Erhalt des oberflächennahen Grundwassers. Wo sie ausgebildet sind, bilden sie die Basis für schwebende Grundwasserkörper, während ihr Liegendes durch die Sümpfungsmaßnahmen oft völlig entleert worden ist. Langfristig, nach Wiederanstieg des Grundwassers, stellen diese Grundwasserstauer eine Barriere zwischen den neugebildeten oberflächennahen Grundwässern und den tieferen, überwiegend durch Flutung mit Flusswasser des Rheins und der Rur wiederhergestellten, aber durch Pyritoxidation geschädigten „Ersatz-Grundwässern“ dar.

Wasserhaltung

Die sehr umfangreichen Wasserhaltungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlenrevier sind Voraussetzung für die Gewinnung der Braunkohle im Tagebaubetrieb. Die Maßnahmen zur Wasserhaltung umfassen die Verlegung von Vorflutern, die Sümpfung des Grundwassers bis unter die Tagebausohlen, Maßnahmen zur Grundwasseranreicherung zwecks Minderung von Kollateralschäden des Bergbaus, kontrollierte Flutungsmaßnahmen am Ende der Braunkohlengewinnung zur schnelleren Wiederherstellung naturähnlicher Grundwasserverhältnisse, sowie die Gestaltung und Flutung der verbliebenen Tagebau-Restlöcher.

Sümpfung

Braunkohletagebaue schließen zu einem gegebenen Zeitpunkt immer nur einen grabenartigen Teilabschnitt eines Abbaufeldes auf, bis zur Liegendgrenze des untersten zu gewinnenden Braunkohlenflözes. Dieser Graben durchwandert mit seiner Längsseite das Abbaufeld, indem auf der Vortriebsseite schichtweise das Deckgebirge und die Braunkohlenhorizonte abgetragen werden und der Abraum auf der Rückseite des Grabens (oder an anderer Stelle) über Bandförderanlagen und Absetzer wieder verkippt und rekultiviert wird. Am Rande und auf der Vortriebsseite des Tagebaus müssen 5 bis 7 Jahre im Voraus Brunnengalerien angelegt werden um das Grundwasser bis auf die Tagebausohle abzusenken und die tieferen Grundwasserleiter zu entspannen (Abbildung 31).

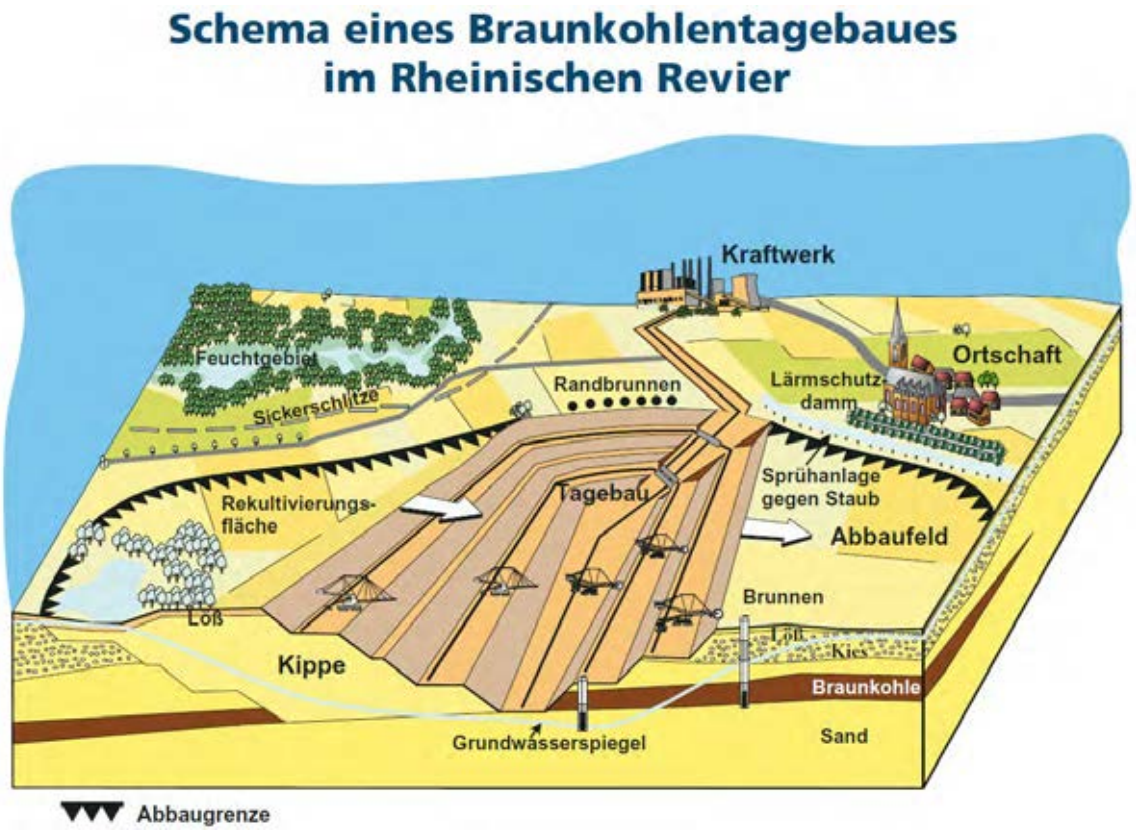


Abbildung 31 – Betrieb eines Braunkohlentagebaus im Rheinischen Revier (DEBRIV 2013a)

Die Wirkungsweise der Tagebauentwässerung ist in Abbildung 32 dargestellt. Im Vorfeld des Tagebaus muss das Grundwasser in allen Grundwasserleitern bis unter die Tagebausohle abgesenkt werden. Dadurch entstehen Absenkungstrichter, in denen der Grundwasserspiegel nach unten gezogen und das zuvor wassergesättigte Sediment belüftet wird. Wo im Hangenden der entwässerten Grundwasserleiter keine stauenden Schichten vorkommen, herrschen auch bis in diese tieferen Horizonte grundwasserfreie, in größerer Entfernung immer noch teilentspannte Verhältnisse.

Jedes Grundwasserstockwerk hat seinen eigenen Absenkungstrichter, das heißt, die gespannten Grundwasserleiter erfahren einen in Richtung des Tagebaus zunehmenden Druckabfall. In der Gegenrichtung lässt sich dieser Druckabfall noch weit über das eigentliche Bergbaurevier hinaus durch eine abgesenkte Grundwasserdruckfläche nachweisen. Besonders die guten Grundwasserleiter bilden flache Absenkungstrichter, die in der Fläche auch weit über den Absenkungstrichter des obersten Grundwasserleiters hinausreichen (Abbildung 32).

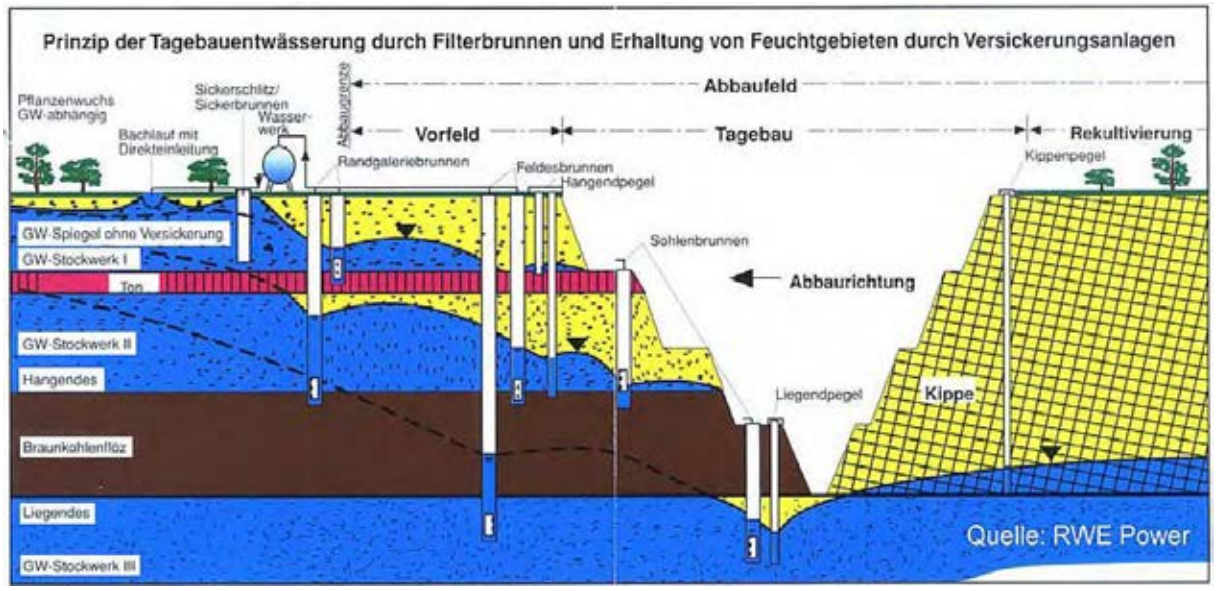


Abbildung 32 – Schematische Darstellung der Sümpfung eines Braunkohlentagebaus im Rheinischen Revier. (Quelle: BUND 2005, nach RWE Power)

Die Entspannung der Grundwasserleiter im „betrieblichen Liegenden“, also unterhalb der Tagebausohle, ist erforderlich um massive Grundwasserzutritte und/oder einen hydraulischen Grundbruch zu vermeiden. Die gezielte Druckentspannung erfasste früher nur die unmittelbaren Liegendschichten, wird aber mit zunehmender Abbautiefe (insbesondere Tagebau Hambach), etwa seit 1997, auch auf die tiefsten Stockwerke bis hinab zu den Horizonten 09 und 07 ausgeweitet (Oswald 2007).

Die Entwicklung der Grundwasserabsenkung nach Tiefe und Ausdehnung in den beeinflussten Grundwasserhorizonten ist Gegenstand ständiger Beobachtung durch RWE, den Erft-Verband und das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV). Hierzu wird an mehreren tausend Messstellen in zeitlichen Abständen der Stand des Grundwasserspiegels ermittelt und auf Normalhöhennull (NHN) berechnet. Aus diesen Daten werden

Grundwasserganglinien und Grundwassergleichenkarten konstruiert, ebenso Grundwasserflurabstände und Grundwasserspiegel-Änderungen gegenüber dem Referenzjahr 1955 (vor Beginn der umfangreichen Sümpfungsmaßnahmen).

Da man sich inmitten eines langjährigen und großräumigen Prozesses zur Sümpfung ausgedehnter Grundwasserleiter befindet, handelt es sich bei diesen Darstellungen des Grundwassers um ausgeprägt instationäre, also Ungleichgewichts-Zustände, im Gegensatz zu annähernd stationären Gleichgewichten in ungestörten hydrogeologischen Systemen.

Oberste Grundwasserleiter

Die Grundwasserstände unter Flur vor Beginn des modernen Tagebaubetriebs können anhand eines (vergriffenen) Kartenwerks aus dem Jahr 1953 (Landesgrundwasserdienst NRW, 1954) nachvollzogen werden. Abbildung 33 zeigt die digitalisierten Grundwassergleichen des obersten Grundwasserleiters für das Jahr 1955 (nach Erftverband 2015), überwiegend in 1m-Abständen. Der Grundwasserspiegel folgt, außer in den angrenzenden Randgebieten, im Wesentlichen der flachen Topographie der Niederrheinischen Bucht.

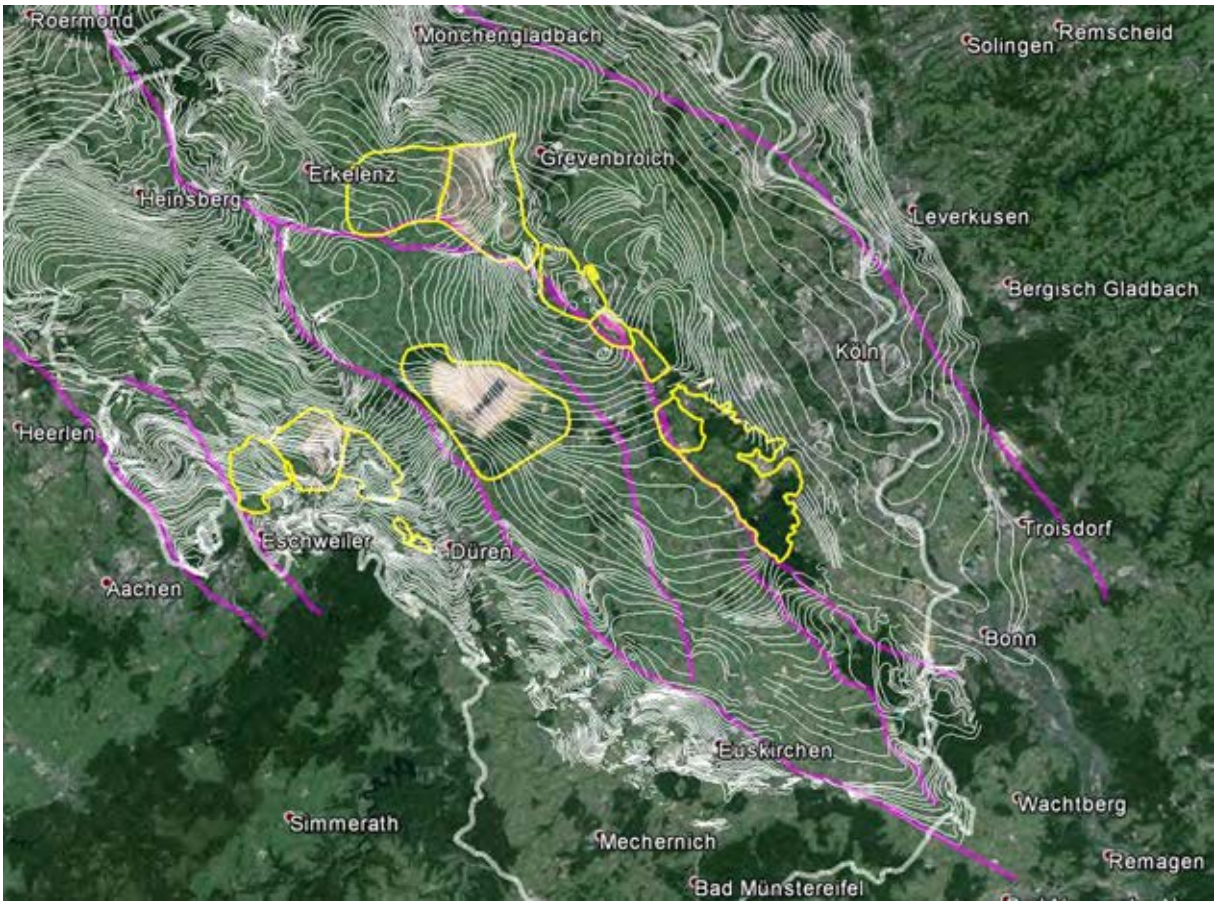


Abbildung 33 – Grundwassergleichen des obersten Grundwasserleiters für das Jahr 1955, also vor Beginn der extensiven Sümpfungsmaßnahmen. Gelb: Braunkohlenabbaue, pink: Hauptverwerfungen. Datenquelle: Erftverband 2015; Kartengrundlage: GoogleEarth.

Seit Beginn der Sümpfung für die modernen Großtagebaue ist der Grundwasserspiegel in weiten Teilen des Arbeitsgebietes in unterschiedlichem Ausmaß gefallen. In Abbildung 34 sind die betroffenen Gebiete mit Stand 2013 dargestellt.

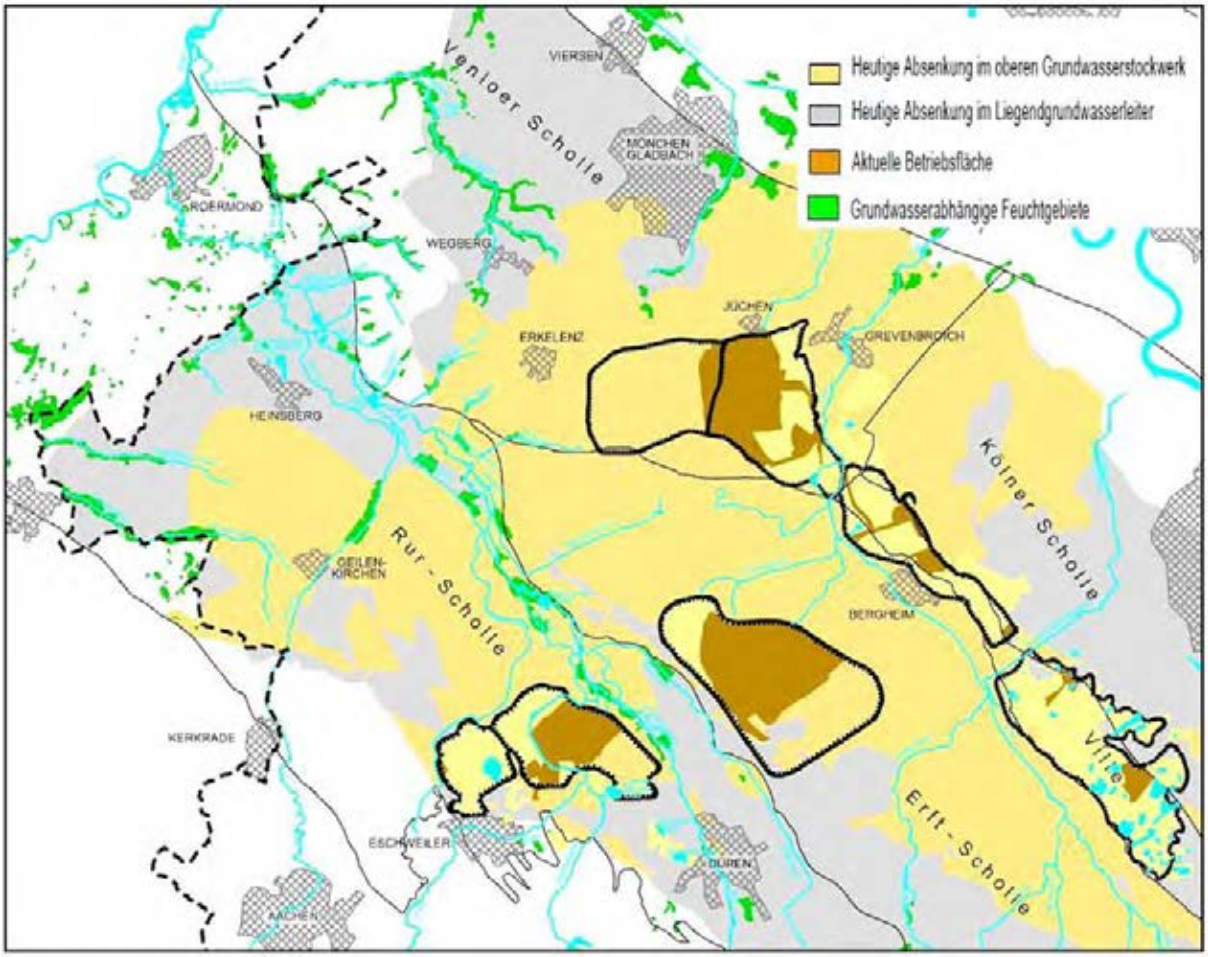


Abbildung 34 – Ausdehnung der Grundwasserabsenkung im oberen und im liegenden Grundwasserleiter. (Nach Forkel 2011, aus Leuchs 2013)

In den oberen Grundwasserstockwerken fanden bereits in den 1970er und 1980er Jahren sehr tiefe Absenkungen im Bereich der Tagebaue Frechen, Fortuna-Garsdorf und Bergheim statt (Siehe Tabelle 2). Fortuna-Garsdorf war damals mit 360 m der tiefste Tagebau der Welt.

In Abbildung 35 sind aus einer Reihe von Jahresberichten des Erftverbands jeweils die -20 m-Konturlinien für die Grundwasserabsenkung (oberste Stockwerke) gegenüber dem Jahr 1953 dargestellt. Man erkennt, dass sich deren Lage und Ausdehnung seit über 50 Jahren kaum verändert hat, und dass diese einen stärkeren Bezug zu den alten Tagebauen haben, insbesondere zu Fortuna-Garsdorf und Garzweiler I, als zu dem Tagebau Hambach, der abseits davon liegt. Die darüber hinaus gehenden Auswirkungen der Sümpfung des Tagebaus Hambach betreffen besonders die tieferen Grundwasserleiter.

Tabelle 2 – Tiefenangaben zu den Tagebauen		
Tagebau **Betriebszeitraum**	**Sohltiefe** **(m NHN)**	**Teufe** **(m unter Flur)**
Frechen 1951-1986		250 m
Bergheim 1984-2002		280 m
Fortuna-Garsdorf 1955 - 1993		360 m
Hambach 1978 - 2045	-370	450 m
Zukunft-West 1935-1987	-30 ?	180 m
Garzweiler I und 2 1983 - 2045	-140	210 m
Inden 1 und 2 1981 – 2030	-134	230 m

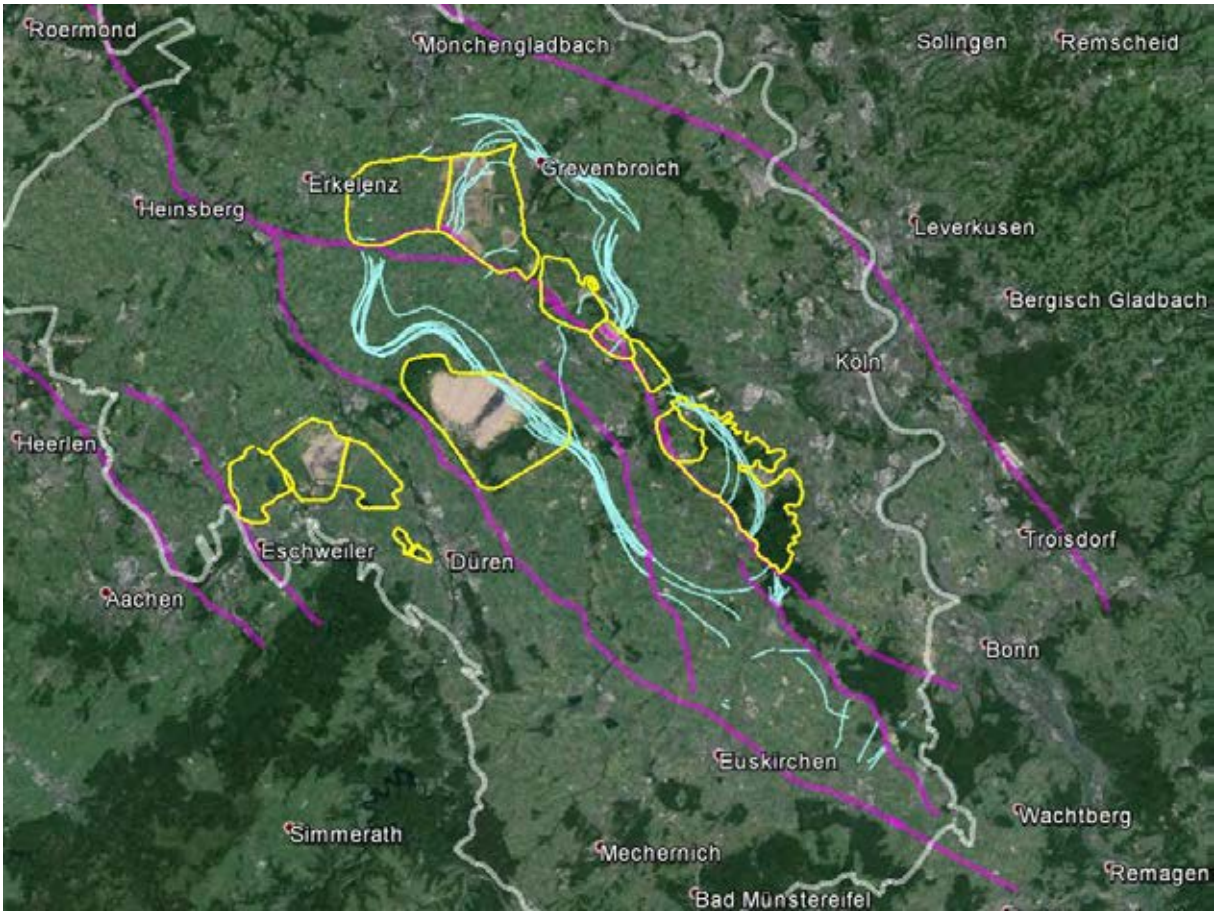


Abbildung 35 – Oberer Grundwasserleiter im Bereich der Erft-Aue, Grundwasserabsenkungen ≥ 20 m (gegenüber 1955) für die Jahre 1961, 1969, 1980, 1983, 1989, 1990, 2000, 2012 und 2013 (hellblau). Abbaugebiete gelb umrandet, Hauptverwerfungen pink, Arbeitsgebietsgrenze weiß. Datenquelle: Erftverband; Kartengrundlage: GoogleEarth

In diesem Bereich, der im Wesentlichen die Erft-Auen zwischen Grevenbroich im Norden und Erftstadt/Lechenich im Süden umfasst, finden auch merkliche Bodenabsenkungen statt (s.u.). In einem deutlich kleineren Kerngebiet werden auch in der Nachbergbau-Ära dauerhafte Maßnahmen zur Absenkung des Grundwasserspiegels gegenüber dem vorbergbaulichen Grundwasserstand erforderlich bleiben („Ewigkeitslasten“), um den Grundwasserflurabstand in dem um mehrere Meter abgesunkenen und mittlerweile dicht besiedelten Raum an die etablierte Nutzung anzupassen (Abbildung 36). Die Ursachen (Bodensenkungen) werden im nächsten Kapitel behandelt. Die prognostizierten wie auch die tatsächlichen Grundwasserflurabstände hängen unmittelbar mit dem zukünftig betriebenen Sümpfungsaufwand zusammen.

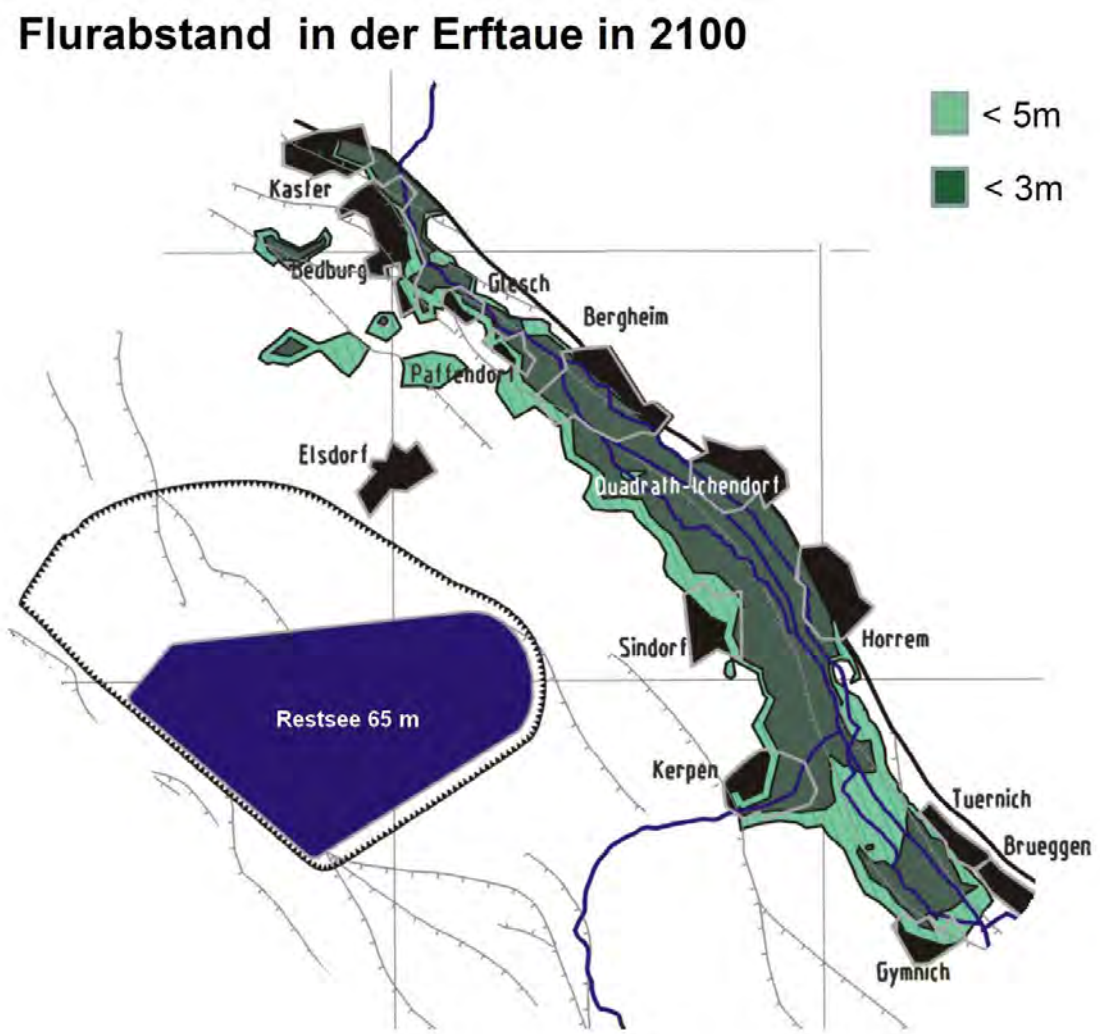


Abbildung 36 – Prognostizierte Grundwasserflurabstände (ohne Sümpfung) in der Erft-Aue für das Jahr 2100, nach Wiederanstieg des Grundwassers. Umgestaltet, nach Leuchs (2013)

Tiefe Grundwasserleiter

In den tieferen Grundwasserleitern reichen die Sümpfungseinflüsse wesentlich weiter als in Oberflächennähe, denn mit zunehmender Tiefe werden die „Absenkungstrichter“ immer breiter. In erster Näherung wächst die Fläche des beeinflussten Gebietes proportional zum Quadrat zur Absenkungstiefe, das gesümpfte Volumen proportional zur dritten Potenz der Absenkungstiefe. Der Druckabfall in den Liegendgrundwasserleitern reicht bis weit über die holländische Grenze hinaus (Vgl. Abbildung 34).

Während die Situation in den oberflächennahen Grundwasserleitern, zumindest im Kerngebiet der Erftscholle, seit vielen Jahren mehr oder weniger unveränderlich ist, finden heute die stärksten Veränderungen in den tieferen Grundwasserleitern statt. Die fortschreitende Sümpfung für den Tagebau Hambach (Vgl. Tabelle 3) erfordert nach dem aktuell geltenden Braunkohlenplan und dem 3. Rahmenbetriebsplan noch bis zum Jahr 2030 weitere Absenkungen des Grundwassers, besonders im Horizont 8 (Hauptkiesserie) und dem Liegendgrundwasserleiter (Horizont 6B). Der Liegendgrundwasserleiter des Flözes Frimmersdorf (6B) soll demnach im Tagebaubereich noch bis auf -365m NHN komplett entleert werden.

Tabelle 3 – Entwässerungsziele für den Tagebau Hambach (RWE 2011) (Höhenangaben in m NHN)

Horizontbezeichnung nach Schneider und Thiele	Grundwasserspiegel im Jahre 2009		Entwässerungsziele	
	Anschnittbereich 2020	Anschnittbereich 2030	2020	2030
16	+42	+54	+36	+48
10/ 9B	-47	-52	-65	-58
8	-160	-145	-170	-175
7	-150	-125	-245	-260
6B	-260	-210	-345	-365
5	-210	-200	-320	-355
4	-200	-290	-300	-330
2	-195	-185	-245	-290
09	-130	-120	-195	-215

Mit der Stilllegung der Tagebaue in der Ville, insbesondere dem 360 m tiefen Tagebau Fortuna-Garsdorf im Jahr 1993, wurde in den tieferen Grundwasserleitern das Absenkungsmaximum sukzessive nach Südwesten zum nochmals um 90 m tieferen Tagebau Hambach verlagert. Dieser soll seine maximale Tiefe von 450 m an seinem Ostrand nahe Heppendorf erreichen. Diese Verlagerung ist aus Abbildung 37 zu entnehmen.

Der aktuelle Zustand des Grundwassers in Horizont 5 (Liegendgrundwasserleiter der Hauptflözgruppe; Stand Oktober 2013) ist in Abbildung 38 wiedergegeben. Man erkennt den tiefen Absenkungstrichter um den Tagebau Hambach, und weitere Absenkungszentren sind im Tagebau Garzweiler II (-80 m NHN) und am Ostrand des Tagebaus Inden II (- 80 m NHN) zu erkennen.

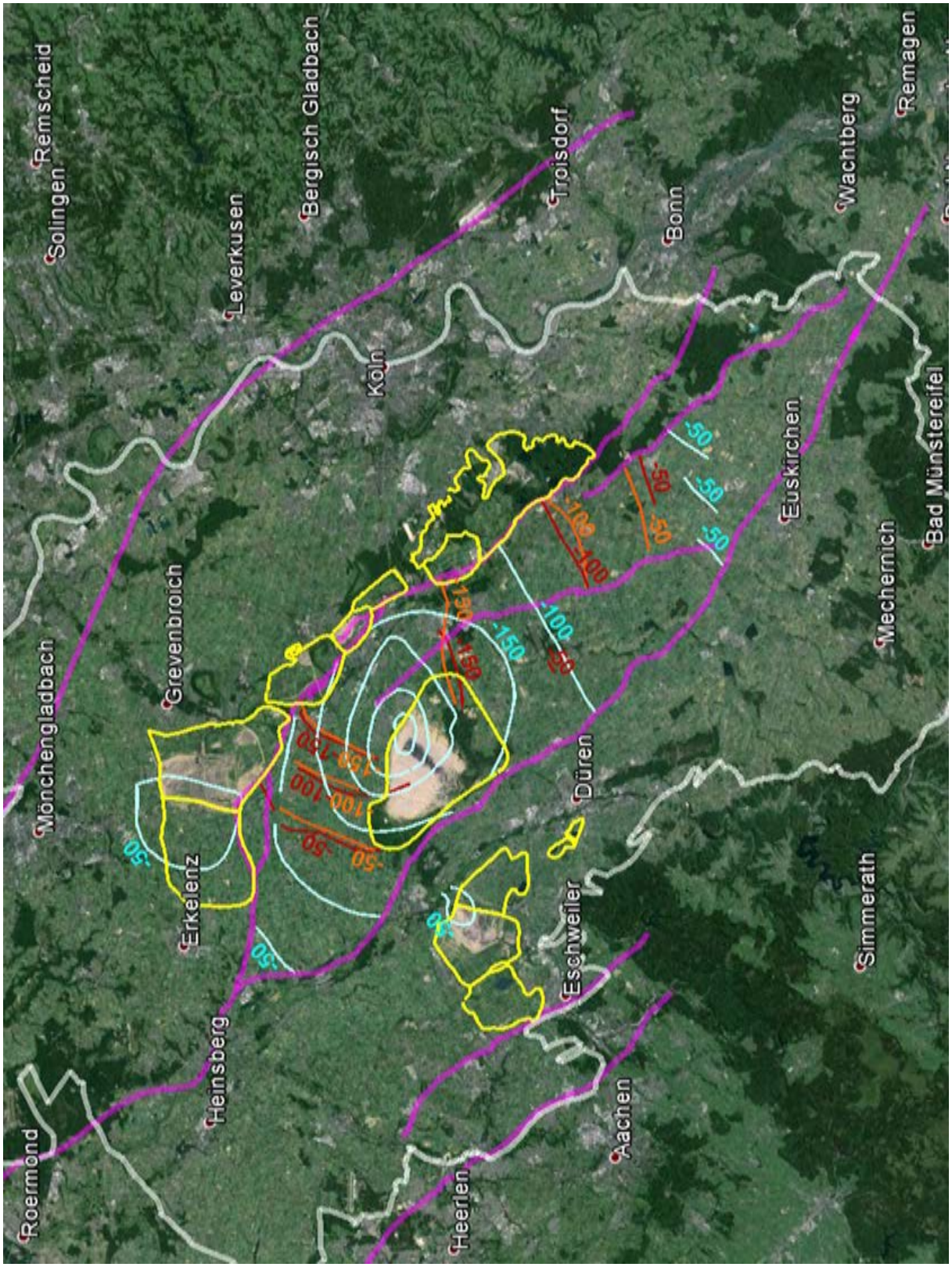


Abbildung 37 – Grundwassergleichen für die tieferen Grundwasserleiter in den Jahren 1999 (orange), 2009 (rot) und 2013 (hellblau). Man erkennt die Verlagerung des Absenkungszentrums von den Tagebauen Fortuna-Garsdorf, Bergheim und Frechen hin zum Tagebau Hambach.

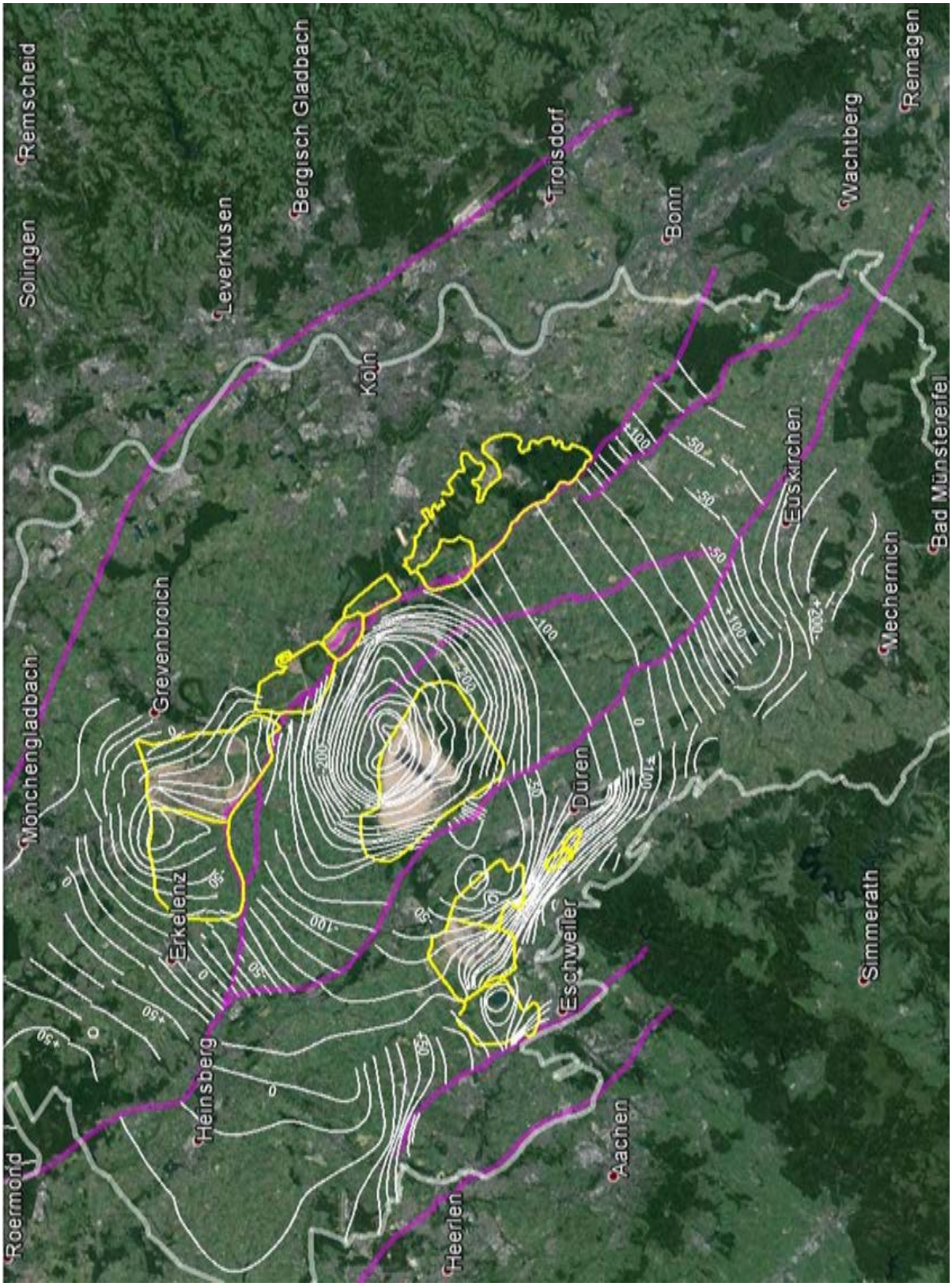


Abbildung 38 – Grundwassergleichen (in m NHN) für den Liegend-Grundwasserleiter, Horizont 5, im Oktober 2013, Hauptverwerfungen (pink) und Abbaufelder (gelb). (Datenquelle: Erftverband (2015), Kartengrundlage: GoogleEarth.)

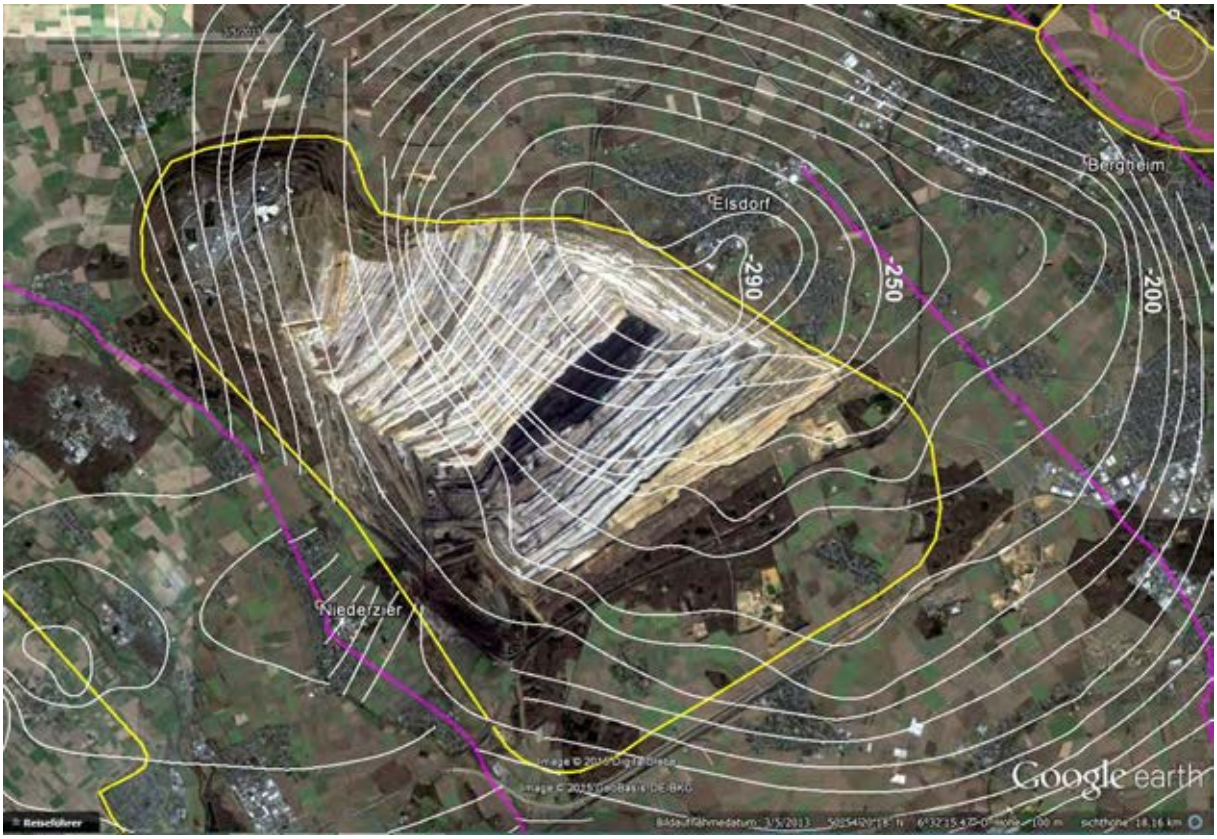


Abbildung 39 – Luftaufnahme des Tagebaus Hambach vom 5. März 2013 mit freigelegtem Braunkohlenflöz (dunkelbraun). Überlagert mit Grundwassergleichen für den Liegend-Grundwasserleiter (Horizont 5) vom Oktober 2013. (Datenquelle: Erftverband (2015), Kartengrundlage: GoogleEarth.)

Abbildung 39 zeigt die Grundwasserabsenkung im Bereich des Tagebaus Hambach im Jahr 2013. Am Nordostrand, also der tiefsten Stelle des Aufschlusses, ist das Grundwasser bereits auf -290 m NHN abgesenkt. Mit fortschreitendem Abbau nach Südosten soll das Grundwasser des Horizonts 5 schließlich bis auf -355 m NHN abgesenkt werden. Das Absenkungsmaximum wird sich zukünftig weiter vertiefen und in Richtung Südost, also in Richtung Berrendorf-Wüllenrath und Heppendorf, verlagern. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass das zu sümpfende Wasservolumen etwa in der dritten Potenz mit der Absenkungstiefe anwächst.

Die Grundwasserabsenkung des Tagebaus Inden reicht zwar nicht so tief wie die des Tagebaus Hambach, doch sind noch weit jenseits der deutsch-holländischen Grenze die Auswirkungen feststellbar. Abbildung 40 zeigt die Ganglinien einer Mehrfachmessstelle im holländischen Teil der Rur-Scholle in Süd-Limburg. Seit ca. 1990 erkennt man eine Umkehr der Druckunterschiede und damit einen Wechsel von Exfiltration zu Infiltration.

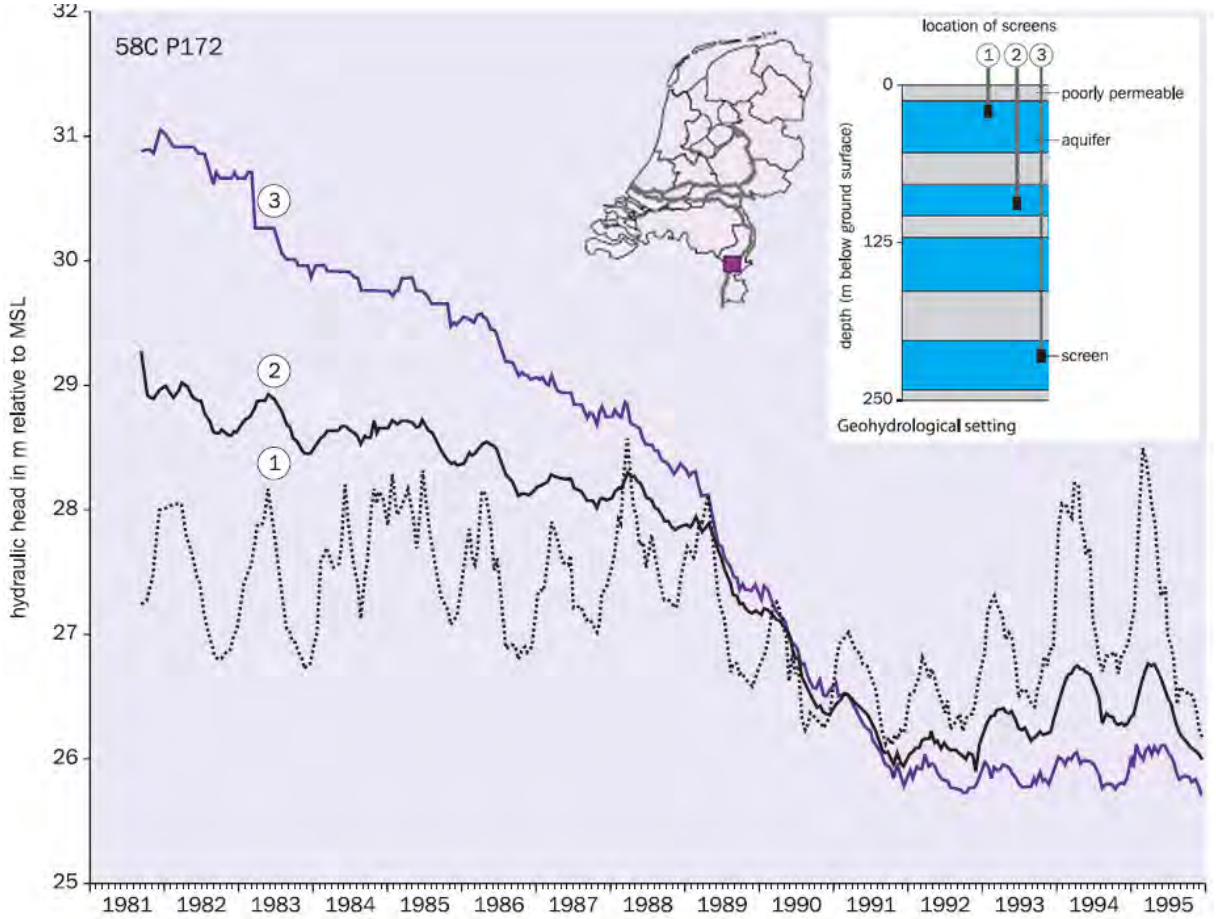


Abbildung 40 – Entwicklung der Grundwasserdruckspiegel in 3 tieferen Grundwasserleitern im holländischen Teil des Rur-Grabens. (Nach de Vries 2007)

Grundwasserbilanzen

Die geförderten Grundwassermengen sind außerordentlich groß und lagen in den 1960er bis Mitte der 1980er Jahre deutlich über 1 Mrd. m³/a (> 1km³/a), wie die Grafiken in den Abbildungen 41 und 42 verdeutlichen. Bezogen auf die hydrogeologischen Teilräume fanden die umfangreichsten Grundwasserabsenkungen im Bereich der Erft-Scholle und der südwestlichen Kölner Scholle im Umfeld der ehemaligen Tagebaue Fortuna, Bergheim und Fortuna-Garsdorf statt.

Nach einem Rückgang der geförderten Grundwassermengen Anfang der 1990er Jahre findet seither, mit zunehmender Abbautiefe in den Tagebauen Hambach und Garzweiler, wieder eine Zunahme der Sümpfungswassermengen in der Erft- und Venloer Scholle statt, mit weiterhin steigender Tendenz. Bucher (2010) rechnet für die beiden kommenden Jahrzehnte (also bis 2030) mit einem Anstieg auf ca. 650 Mio. m³/a. Diese Prognosen scheinen im Vergleich zu früheren Sümfungswassermengen bis 1.300 Mio. m³/a nicht ohne weiteres plausibel, weil der Tagebau Hambach wesentlich tiefer als alle bisherigen Tagebaue reichen soll und weil der Sümpfungsaufwand in der dritten Potenz zur Sümpfungstiefe zunimmt.

Nur ein kleiner Anteil des geförderten Grundwassers wird genutzt, unter anderem zur künstlichen Grundwasseranreicherung (s.u.).

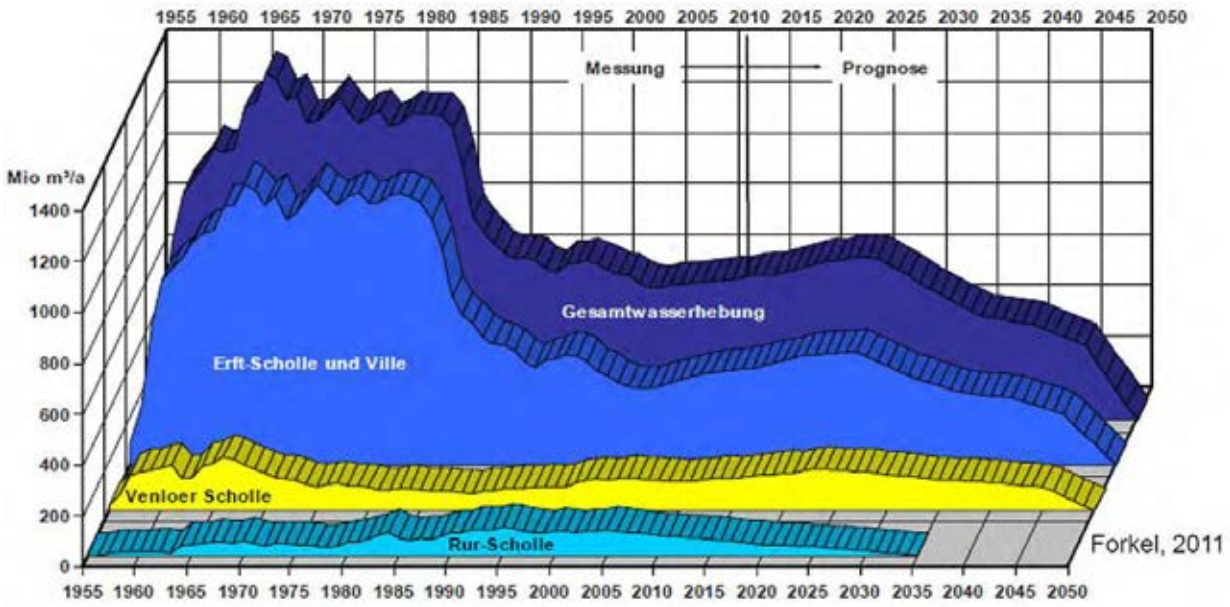


Abbildung 41 – Sümpfungswassermengen im rheinischen Braunkohlenrevier.
(Nach Forkel 2011, aus Leuchs 2013)

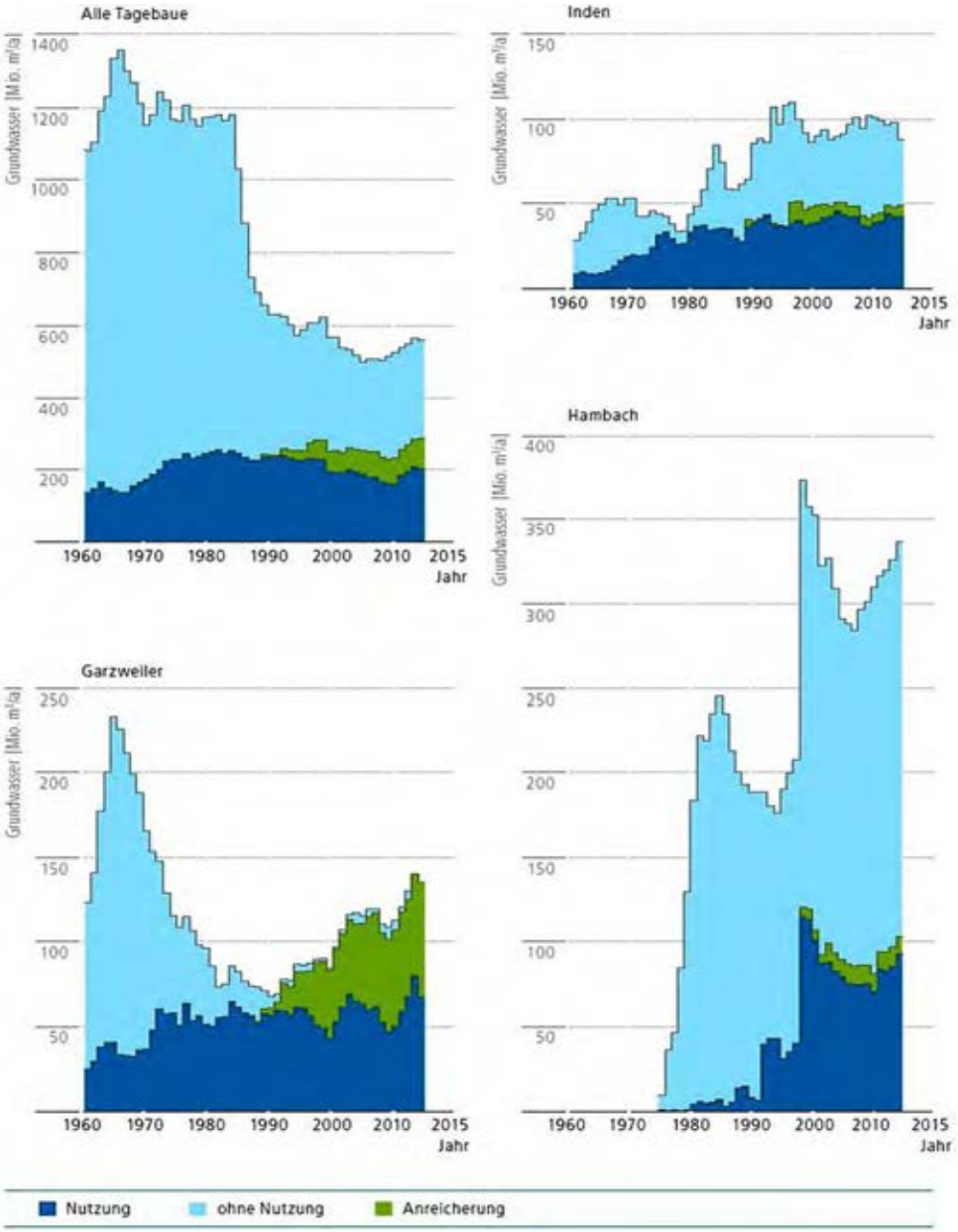


Abbildung 42 - Zeitliche Entwicklung des vom Braunkohlenbergbau geförderten Grundwassers. (Erftverband 2013 b)

Abbildung 43 zeigt die Grundwasserbilanz für das Jahr 2013 in den hydrogeologischen Teilräumen. Diese Bilanzbetrachtungen zeigen, dass im Einflussbereich des Braunkohlenbergbaus die Grundwasserneubildung von ca. 745,6 Mio. m³/a die Entnahmen durch Sümpfungsmaßnahmen und sonstige Grundwasserentnahmen (z.B. für Trinkwasser) nicht kompensieren kann.

Besonders im Bereich der Erftscholle wird deutlich mehr Grundwasser gefördert als es der Neubildung und den Zuflüssen entspricht. Das heißt, die Erft-Scholle wird weiter „leer gepumpt“, vor allem um das Sümpfungsziel für den Tagebau Hambach zu erreichen.

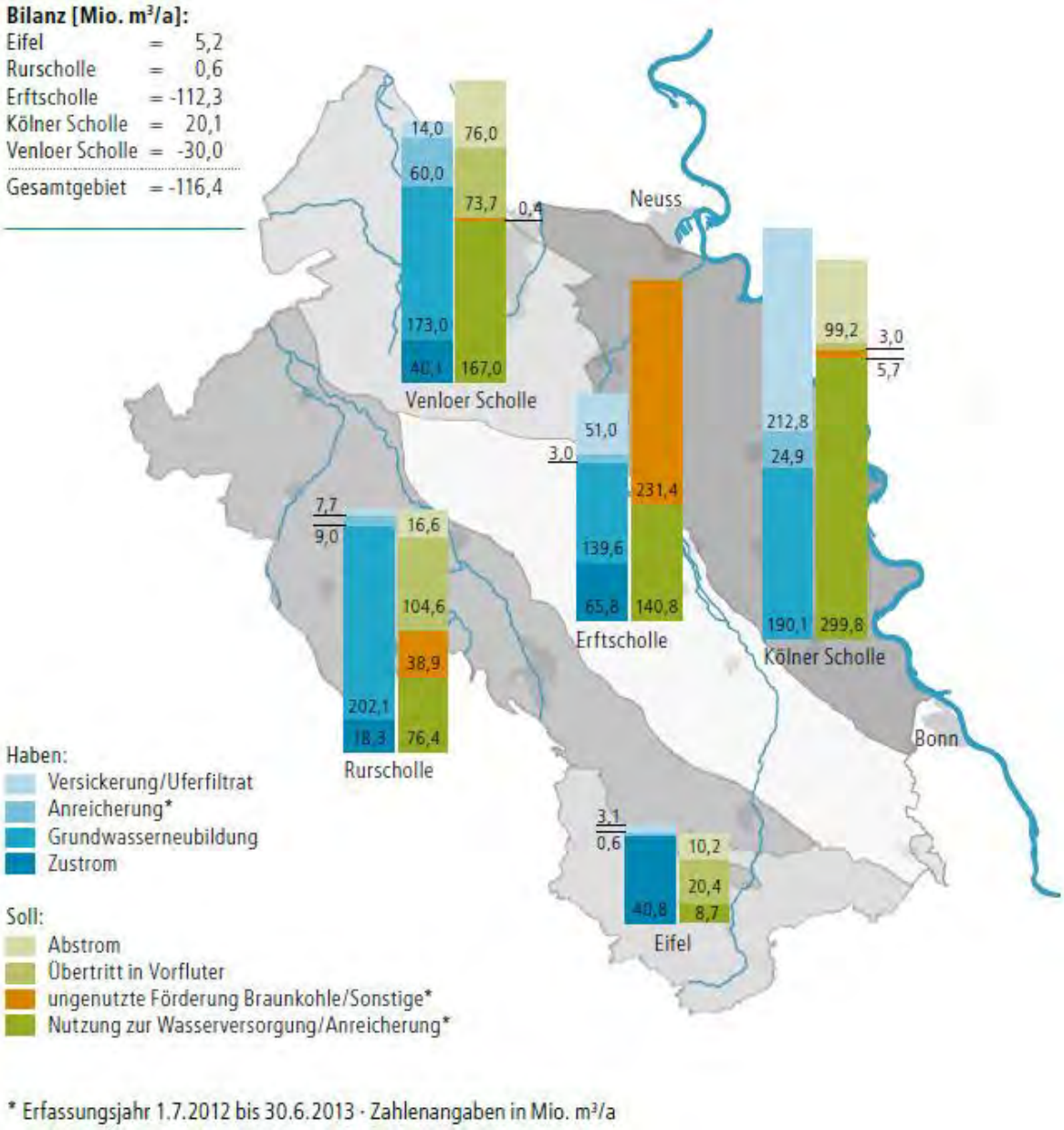


Abbildung 43 – Unausgeglichene Grundwasserbilanzen im rheinischen Braunkohlenrevier. (Erftverband 2013 b)

Zwischenfazit Grundwasserbilanz:

Die Angaben über die geförderten Grundwassermengen erfordern viel Vorstellungskraft, und der durch Darstellungen der Grundwassergleichen umschriebene Zustand der Grundwasserkörper in den zusammen bis zu 1000 m mächtigen tertiären und quartären Sedimenten ebenso. Man muss sich klar machen, dass insbesondere die Erft-Scholle in einem Gebiet von ca. 15 km x 60 km bis in mehrere hundert Meter Tiefe leer gepumpt worden ist und für den Tagebau Hambach weiter leer gepumpt wird.

Bis 2030 soll das Grundwasser im Bereich des Tagebaus Hambach auf fast 400 m unter Meeresniveau oder 500 m unter Gelände abgesenkt werden. Die Prognosen der dafür notwendigen Sümpfungswassermengen erscheinen vor dem Hintergrund der bisherigen Erfahrungswerte, der deutlich tieferen Grundwasserabsenkung und der damit in der dritten Potenz zunehmenden Förderraten überprüfungsbedürftig. Auch in den tiefsten Grundwasserleitern wirken sich die Druckentlastungen vertikal bis hinab zur Tertiärbasis aus (Horizonte 01-09; Vgl. Abbildung 28), regional bis in die Niederlande.

In der heutigen, sinnvollen Nutzung eines Teils des geförderten Grundwassers liegt zugleich ein Problem für die Zeit nach dem aktiven Bergbau, weil dann diese wasserwirtschaftlich benötigten Mengen aus anderen Quellen gespeist werden müssen. Das Dargebot von sauberem Grundwasser wird aber aufgrund der Kippenwasser-Problematik geringer werden, so dass die Schere zwischen Nachfrage und Dargebot weit auseinander gehen dürfte.

Angesichts der enormen bewegten Massen leiten sich eine Reihe weiterer wichtiger Fragestellungen ab.

- Wie gut bzw. schlecht ist eigentlich die Energieeffizienz der Braunkohleverstromung insgesamt? – Der Eigen-Energiebedarf des Braunkohlenbergbaus (einschließlich anderer Energieträger wie Diesel), für die mehrere hundert Meter tiefe Umschichtung ganzer Landschaften und für die gegenwärtigen und zukünftigen Wasserhaltungsmaßnahmen (Ewigkeitslasten), dürfte einen signifikanten Anteil der Brutto-Stromerzeugung ausmachen, der einmal bilanziert und beziffert werden sollte.
- Wie groß sind die belüfteten Bereiche der entwässerten Grundwasserleiter? – Wieviel Pyrit wird durch den ins unverritzte Nebengebirge eingetragenen Luftsauerstoff zusätzlich oxidiert? – Auf welchen Wegen entweicht diese „Luft“ beim Wiederanstieg des Grundwassers und welche Zusammensetzung wird sie dann haben (CO2, Methan, Radon, etc…)?
- Welche geochemischen Folgen werden aus der Anpassung chemischer Gleichgewichte zwischen der Gesteinsmatrix und dem ortsfremden Flutungswasser (Flusswasser) erwartet?
- Wie wirkt sich die Wiederbelastung des Gebirges durch das Gewicht des ansteigenden Grundwassers und der Tagebauseen gebirgsmechanisch aus? Welche seismischen Ereignisse müssen ggf. erwartet werden? – Hier könnten Analogien zu Stauseen bestehen, bei denen in vielen Fällen induzierte Laständerungen seismische Reaktionen hervorgerufen haben, mit maximal beobachteten Magnituden (Richterskala) von 6,5 bis 7,5 (Konya bei Bombay, 10.12.1967; Wikipedia 2015). Besonders problematisch erscheint in diesem Zusammenhang das Zusammenwirken mit der aktiven Störungstektonik in der Niederrheinischen Bucht.

Grundwasseranreicherung

Seit den 1990er Jahren wird ein Teil des Sümpfungswassers an anderer Stelle zur Anreicherung des oberen und teilweise auch der tieferen Grundwasserstockwerke und zur Aufrechterhaltung der Wasserführung von Fließgewässern genutzt (Abbildung 44), mit dem Ziel, Schäden am Grundwasserhaushalt und den davon abhängigen Ökosystemen zu verringern und die räumliche Ausdehnung der Grundwasserabsenkung einzuengen. Hervorzuheben ist hier insbesondere der in Abbildung 44 dargestellte Bereich nördlich des Tagebaus Garzweiler, in dessen Westabschnitt sich der Naturpark Schwalm-Nette mit zahlreichen Feuchtbiotopen befindet.

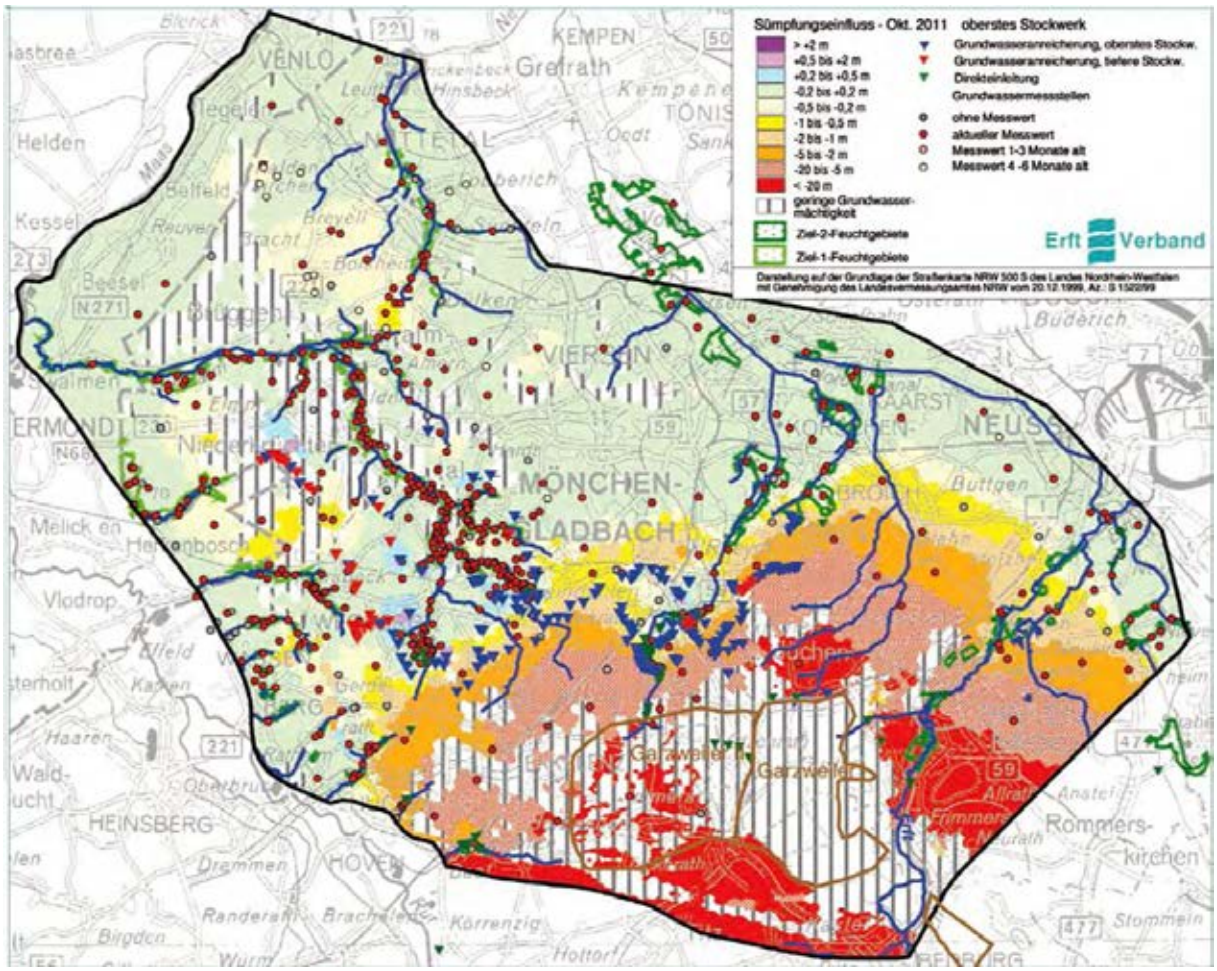


Abbildung 44 – Sümpfungseinfluss auf die Grundwasserstände gegenüber dem Bezugsjahr 1955 und Lage der Schluckbrunnen und hydrologischen Messstellen. (BezReg Köln 2013, nach Erftverband)

Unbeschadet der Notwendigkeit dieser Maßnahmen soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass hierdurch der Sümpfungsaufwand erhöht wird, weil ein Teil des versickerten Wassers wieder den Sümpfungsbrunnen zuströmt. Hierdurch findet ein weiterer (wenn auch nachrangiger) Effizienzverlust der Braunkohlen-Verstromung statt.

Flutung der Tagebau-Restlöcher

Nach Ende des Gewinnungsbergbaus sollen die verbliebenen Restlöcher umgestaltet und zu großen künstlichen Seen geflutet werden. Die hierfür benötigten Wassermengen sollen aus dem Rhein und aus der Rur abgezweigt werden um den Flutungsprozess zu beschleunigen. Siehe Abbildung 45.

Für den vergleichsweise kleinen Blausteinsee (100 ha), der dem rekultivierten Restloch des bereits 1987 beendeten Tagebaus Zukunft-West entspricht (Vgl. Abbildung 45), wurde das Flutungsziel von +129 m NHN im Jahr 2005 erreicht. Seither treten allerdings signifikante Wasserverluste auf (Aachener Zeitung 2015, Tutthas und Meyer 2014), die deutlich machen, dass der Seewasserkörper hydraulisch an die umgebenden und darunter liegenden Grundwasserleiter angeschlossen ist, die wegen des Tagebaus Inden weiterhin entleert bzw. entspannt werden. Durch das hydraulische Gefälle strömt Seewasser in den Untergrund ab. Dem künstlichen Blausteinsee fehlt offenbar eine natürliche Kolmationsschicht oder künstliche Abdichtungsschicht am Seeboden.

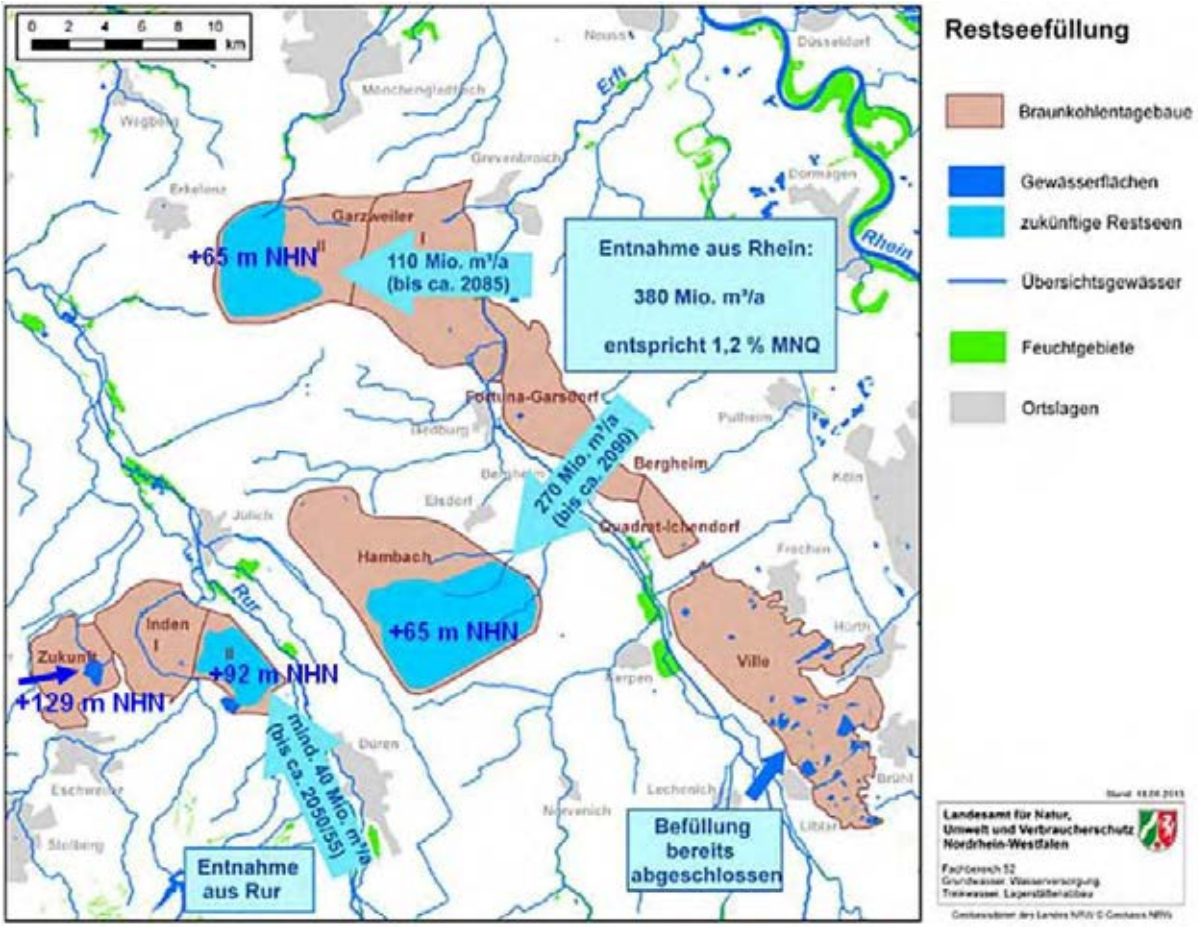


Abbildung 45 – Derzeitige Planungen sehen die Flutung der Restlöcher der drei Großtagebaue vor. (Nach Leuchs 2013, ergänzt vom Verfasser)

Auch zwischen den Flutungszielen der beiden Restseen Hambach und Inden liegt eine erhebliche Höhendifferenz von 27 m. Die Seen befinden sich zwar in unterschiedlichen Schollen und die dazwischen verlaufende Rur-Randstörung soll die entsprechenden hydrogeologischen Einheiten hydraulisch voneinander trennen, so dass ein Abstrom von Grundwasser aus dem Inden-See in den Hambach-See nahezu unmöglich sein soll. Numerische Grundwassermodelle (s.u.) von RWE Power / Erft-Verband (Abbildung 46) und des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) (Abbildung 47) sollen zeigen, dass der Unterschied der Grundwasserspiegel in beiden Schollen im Endzustand etwas mehr als 25 m betragen wird (NRW 2010). Die gleiche Höhendifferenz ist zwischen den Zielpegelständen des Inden-Sees und des Garzweiler-Sees geplant.

Bucher (2010) schreibt: „*Ein durchgreifender Wiederanstieg des Grundwassers in der gesamten Region wird allerdings erst mit dem Ende des Braunkohlenbergbaus – nach heutigem Planungsstand im Jahr 2045 – stattfinden können. An allen derzeit noch aktiven Tagebauen werden dann große Restseen entstehen (…), die mit Wasser aus dem Rhein (Restsee Garzweiler, Restsee Hambach) bzw. aus der Rur (Restsee Inden) innerhalb von einigen Jahrzehnten gefüllt werden. Dies hat zur Folge, dass zu Beginn des nächsten Jahrhunderts der Grundwasseranstieg im Wesentlichen beendet sein wird. In weiten Teilen des Rheinischen Braunkohlengebiets werden dann wieder ursprüngliche (vorbergbauliche) Grundwasserverhältnisse anzutreffen sein*“.

Abbildung 46 – Tagebau-Restseen Inden, Hambach und Garzweiler: Prognosen für die Grundwasserstände im stationären Endzustand im Jahr 2100 (Isolinien in m NHN). (nach Bucher, 2010)

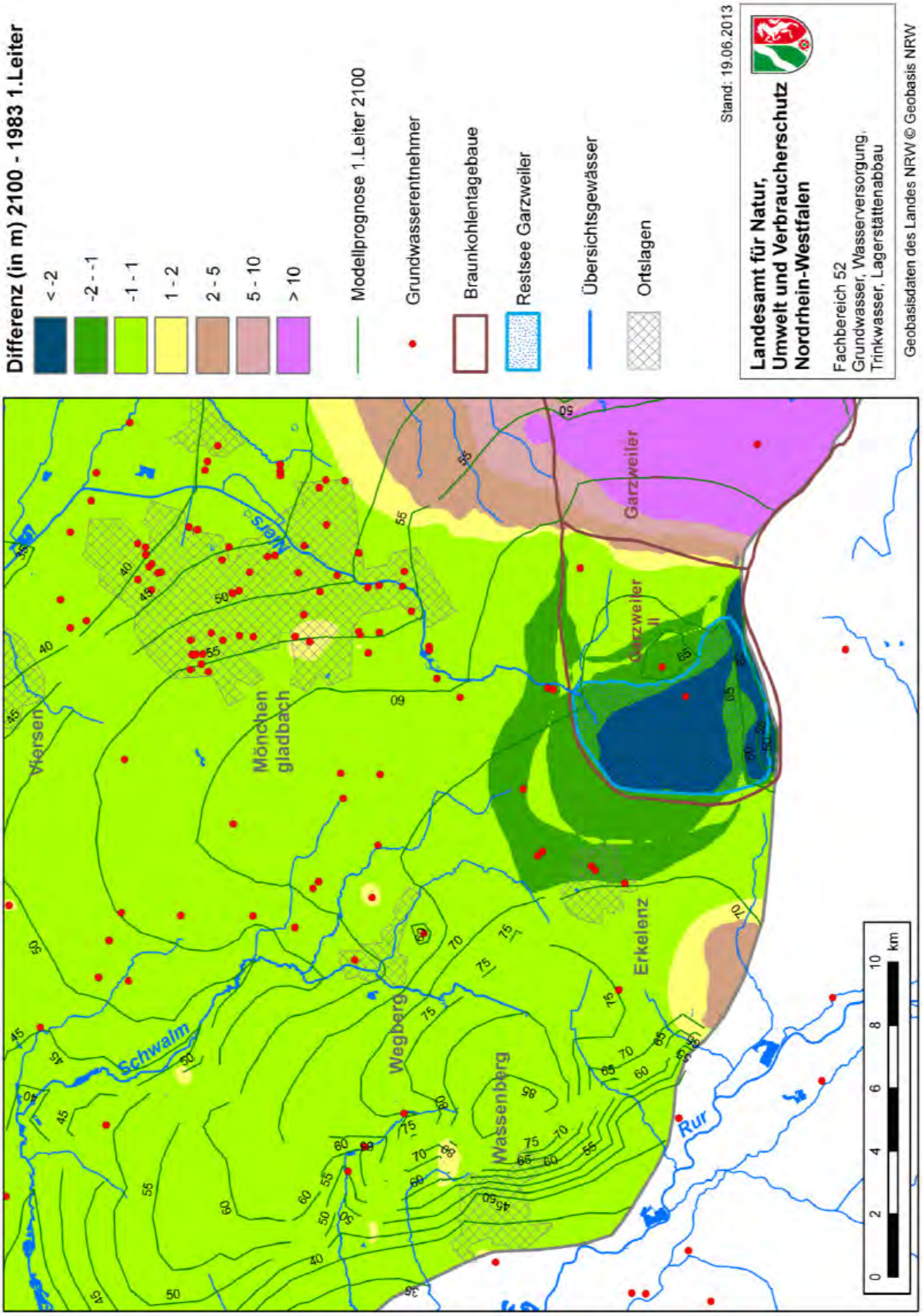


Abbildung 47 – Tagebau Garzweiler: Prognosen für den stationären Endzustand der Grundwasserstände im Jahr 2100 (Isolinien in m NHN) und für die Grundwasserdifferenzen gegenüber 1983 (Farbskala). (Nach Leuchs 2013)

Zwischenfazit Restseen und Grundwasserprognosen:

Dass in weiten Teilen des Rheinischen Braunkohlengebiets zur nächsten Jahrhundertwende wieder ursprüngliche (vorbergbauliche) Grundwasserverhältnisse anzutreffen sein werden, erscheint sehr optimistisch. Auch die Vorstellung einer 25m hohen (stationären) Stufe im Grundwasserspiegel entlang der Rurrandverwerfung (Vgl. Abbildung 46) und die geplanten Flutungsziele für die Tagebauseen könnten unrealistisch sein:

Durch die tiefen Tagebaue und die geplanten Restlochseen bzw. vertikal durchlässigen Kippenmassive ist die ursprüngliche Stockwerkstrennung aufgehoben. Daher werden die Wasserkörper der Restlochseen über den Untergrund hydraulisch miteinander kommunizieren und einen Druckausgleich anstreben. Auch in vollkommen verfüllten Tagebauen wurden sämtliche Grundwasserstauer entfernt und durch Kippenmassive mit ausgedehnten horizontalen Querschnitten ersetzt, die merkliche Wasserdurchlässigkeiten (in Kippen der Lausitz z.B. $k_f \approx 2 \cdot 10^{-5}$ m/s; Bachmann et al. 2007) aufweisen und als hydrogeologische Fenster wirken. Die geplante Höhenstufung der Grundwasserspiegel und der Seenpegelstände wäre daher möglicherweise nur durch aufwändige Wasserhaltungsmaßnahmen aufrecht zu erhalten, in Abstimmung mit Trockenhaltungsmaßnahmen in der Erft-Talaue in der Nachbergbauphase (Ewigkeitslasten).

Vor diesem Hintergrund und den Erfahrungen mit dem Blausteinsee ist fraglich, ob der Inden-See sein Flutungsziel von +92 m NHN überhaupt erreichen und ohne dauerhafte Fremdwasserzufuhr permanent halten kann, bzw. ob und in welcher Höhe ein unterirdischer Abstrom durch die angeschnittenen Grundwasserleiter erfolgen wird. Auf der anderen Seite sind durch den Hambach-See (+ 65 m NHN) und Garzweiler-See (+65 m NHN) Anschnitte in den gleichen Grundwasserleitern erfolgt. Durch die so geschaffenen hydrogeologischen Fenster entstehen Entlastungsbereiche für die angeschnittenen tieferen Grundwasserleiter, die einen Druckabbau ermöglichen. Zwischen den unterschiedlich hoch gelegenen Seenspiegeln sind über die hydrogeologischen Tagebau-Fenster somit hydraulische Druckausgleiche möglich.

Die geplante Überlauf-Entwässerung des Inden-Sees zur Rur könnte daher nicht zu erzielen sein. Dies würde auch einem Verlust an Einzugsfläche und Wasserführung für die Rur gleichkommen, während der Wasserzustrom über den Hambach-See in dessen Vorfluter, die Erft, aufgrund der Seiten- und Liegend-Zuflüsse in den See, entsprechend zunehmen würde. Der Hambach-See selbst wird sein Flutungsziel erreichen können, und sein Seespiegel wird durch Überlauf und Einleitung in die Erft als Vorfluter gesteuert. Durch die unterirdischen Zuströme, mit Auswirkungen auf die höher gelegenen Tagebau-Seen, ergibt sich aber dann ein nochmals höherer Aufwand bei den Wasserhaltungsmaßnahmen (Ewigkeitslasten) in betroffenen Teilen der Erft-Aue.

Diese Kaskade der Wasserstände vom Blausteinsee (+129m NHN) über den Inden-See (+92 m NHN) und Hambach-See (+65 m NHN) in die abgesenkte Erft (kleiner +60m NHN) könnte eventuell unterbrochen oder in der Wirkung gemindert werden, wenn der Tagebau Inden II vollständig verfüllt und auf den Restlochsee verzichtet würde.

Für das Landschaftsbild haben die Planungen zur Folge, dass der vorgesehene Wasserspiegel des Hambach-Sees (+ 65m NHN) am Westufer rund 60 m und am Ostufer rund 25 m unter

Gelände liegen würde, was morphologisch einem Kratersee ähneln würde. Das niedrigste Ufer würde im Verlauf des Wiebachs südlich Wüllenrath entstehen, wo am Tagebaurand eine Geländehöhe von ca. +75m NHN vorliegt. Da in diesem Gebiet auch das zukünftige Bodensenkungs-Maximum von ca. 7m erwartet wird, wird die Geländehöhe noch ca. +68m NHN und die Uferhöhe (Freibord) ebenso wie der Grundwasserflurabstand somit nur noch ca. 3 Meter betragen.

Auch für den Garzweiler See würde sich ein noch recht tief (20m) in die Landschaft eingesenkter See ergeben. Lediglich der Inden-See würde, im Fall der Erreichung des Flutungsziels, aufgrund seiner flacheren Einbettung in die Landschaft ein in etwa natürlich anmutendes Landschaftsbild ermöglichen. Die Planungen für die Tagebauseen sollten daher einer kritischen Prüfung unterzogen werden, auch hinsichtlich der implizierten zusätzlichen ewigen Wasserhaltungsmaßnahmen, die ein erhebliches Ausmaß haben dürften, das beziffert werden sollte.

Hydrogeologische Modelle

Numerische Strömungsmodelle zur Beschreibung und Prognose der Grundwasserbewegungen werden von RWE Power („Reviermodell“), dem Erft-Verband („Nordraummodell“, Beteiligung am „Reviermodell“), sowie dem LANUV zusammen mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen („Großraummodell“) betrieben. Einen Überblick über die im Rheinischen Revier betriebenen Grundwassermodelle mit den jeweiligen Fragestellungen geben Simon (2012) und LANUV (2007a). Einzelheiten zu den Rechenmodellen konnten leider nicht in Erfahrung gebracht werden, weil diese von den Betreibern als Betriebsgeheimnisse und geistiges Eigentum von RWE Power angesehen werden.

Große numerische Modelle wie die oben genannten beanspruchen enorme Rechenleistungen und sind in dieser Hinsicht in ihren Möglichkeiten limitiert. Die im Rheinischen Revier bereits früh begonnenen Modellierungen haben daher nicht das gesamte Gebiet der Niederrheinischen Bucht zusammenhängend modelliert, sondern einzelne Großschollen-Modelle berechnet. Die Modellränder wurden dabei auf die Haupt-Störungen zwischen den Großschollen (Vgl. Abbildung 30) gelegt. Eine aus rechentechnischer Sicht des Modellierers sehr komfortable Festlegung bestand in der Annahme, dass diese Modellränder, also die Störungsflächen, keine hydraulische Durchlässigkeit besitzen würden und als „Randbedingung der zweiten Art“ ins Modell eingehen können.

Aus Sicht des geländeerfahrenen Geologen ist eine solche generelle Annahme jedoch problematisch. Zwar scheinen empirische Befunde, wie verschleppte Tone in aufgeschlossenen Störungsflächen, oder unterschiedliche Grundwasserpegel diesseits und jenseits von Störungen die Annahme dichter Störungsflächen (lokal) zu stützen. Doch können sich die geologische Detailstruktur und der „hydrogeologische Charakter“ einer Störung örtlich ändern, insbesondere bei so ausgedehnten, überregionalen Störungslinien wie jenen der Niederrheinischen Bucht (Vgl. Bense und vanBalen 2004; Knufinke und Kothen 1997). Und bei der Bewertung von Pegelständen muss bedacht werden, dass man sich aufgrund der

laufenden Sümpfungsmaßnahmen in einem extrem instationären, also zeitlich veränderlichen System befindet, es sich also um anthropogen verursachte Effekte und nicht um stationäre Gleichgewichtszustände eines regional ausgeglichenen Grundwassersystems handeln kann.

Bei näherer Prüfung der generierten Karten stell man dann auch häufig fest, dass entlang von Haupt- und etlichen untergeordneten Störungen Sprünge von zum Teil erheblicher Höhe, also Unstetigkeiten, in den Grundwassergleichen dargestellt sind, die in der Natur so nicht vorkommen können, weil es sich um Äquipotential-Linien handelt. Solche Sprungstellen in Äquipotential-Linien sind auch aus mathematisch-physikalischer Sicht nicht möglich. Das Gleiche gilt für sich treffende oder kreuzende Grundwassergleichen (z.B. Abbildung 46).

Das offenbar am weitesten entwickelte Modell ist das Reviermodell von RWE, welches das gesamte Revier abdeckt und als Finite-Volumen-Modell realisiert ist. Das „Reviermodell 2013“ umfasst 151.563 Modellknoten, überdeckt eine Fläche von 4.036 km² und erfasst 12 Modellgrundwasserleiter bis in 2 km Tiefe.

Die nachfolgenden Abbildungen 47 bis 50 sind mit Hilfe öffentlich zugänglicher (Gumm 2011) Modellierungsergebnisse des Reviermodells (RWE Power AG) sowie Störungsverläufen (Erft-Verband 2015) erstellt worden. Sie geben den Zustand verschiedener Grundwasserstockwerke im Jahr 2005 wieder.

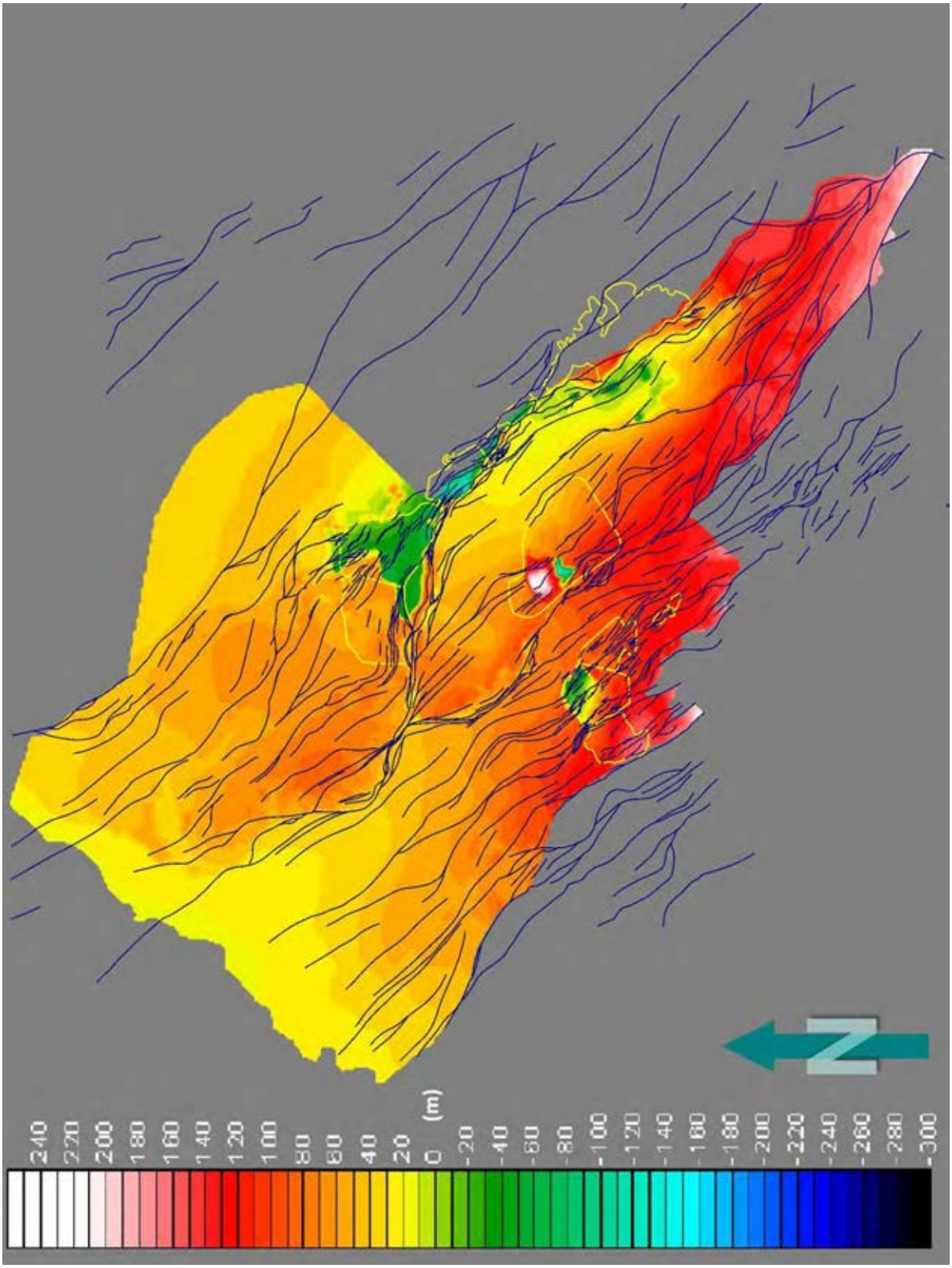


Abbildung 48 – Reviermodell (2005) des Oberen Grundwasserstockwerks (Pleistozäne Hauptterasse, Horizonte 14 bis 16). (Zusammengestellt aus Unterlagen in Gumm 2011, Erftverband 2015, nach RWE Power AG)

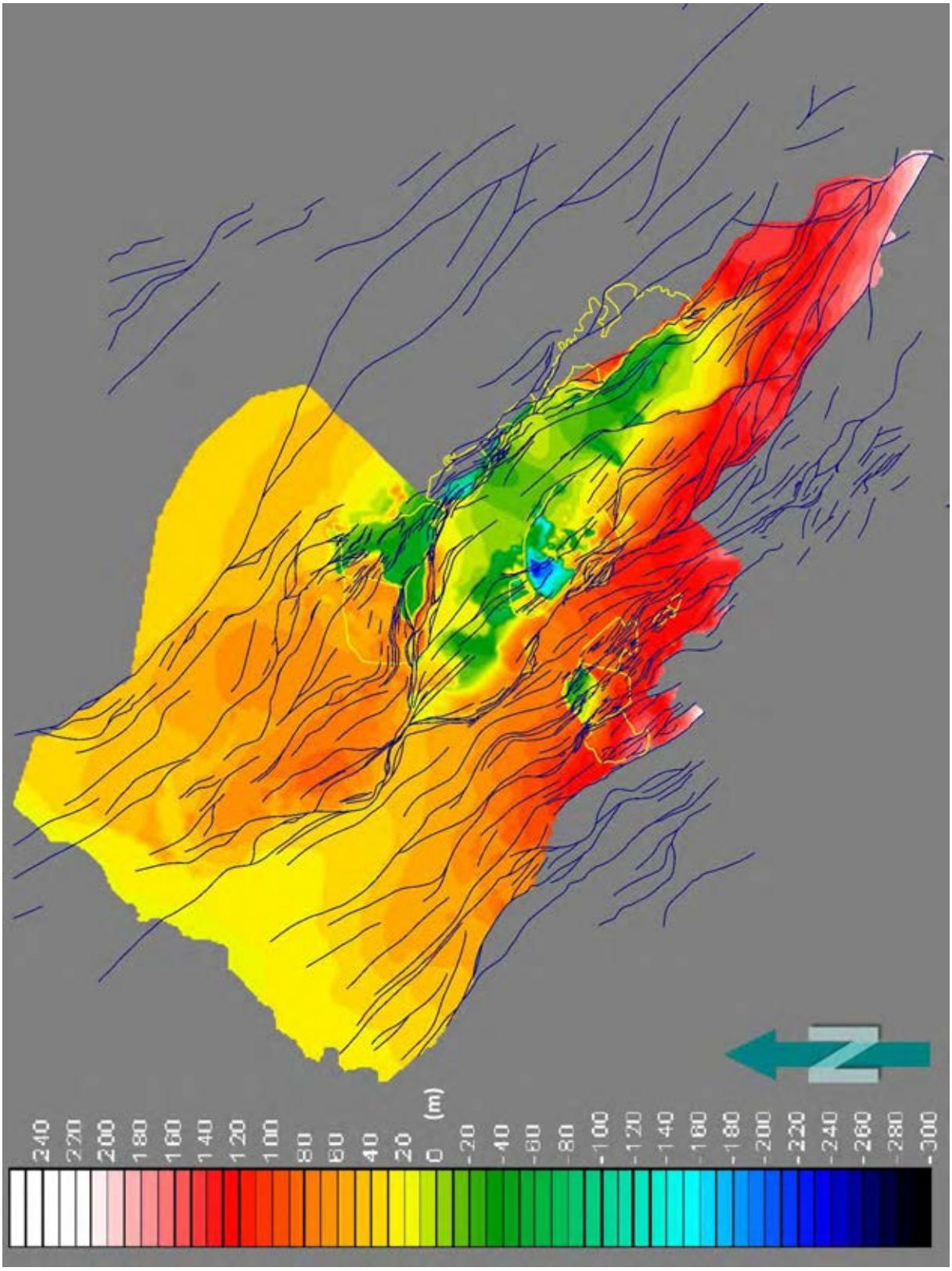


Abbildung 49 – Reviermodell (2005) des Zweiten Grundwasserstockwerks (Reuver- und Rotton-Serien, Horizonte 9 bis 11). (Zusammengestellt aus Unterlagen in Gumm 2011, Erftverband 2015, nach RWE Power AG)

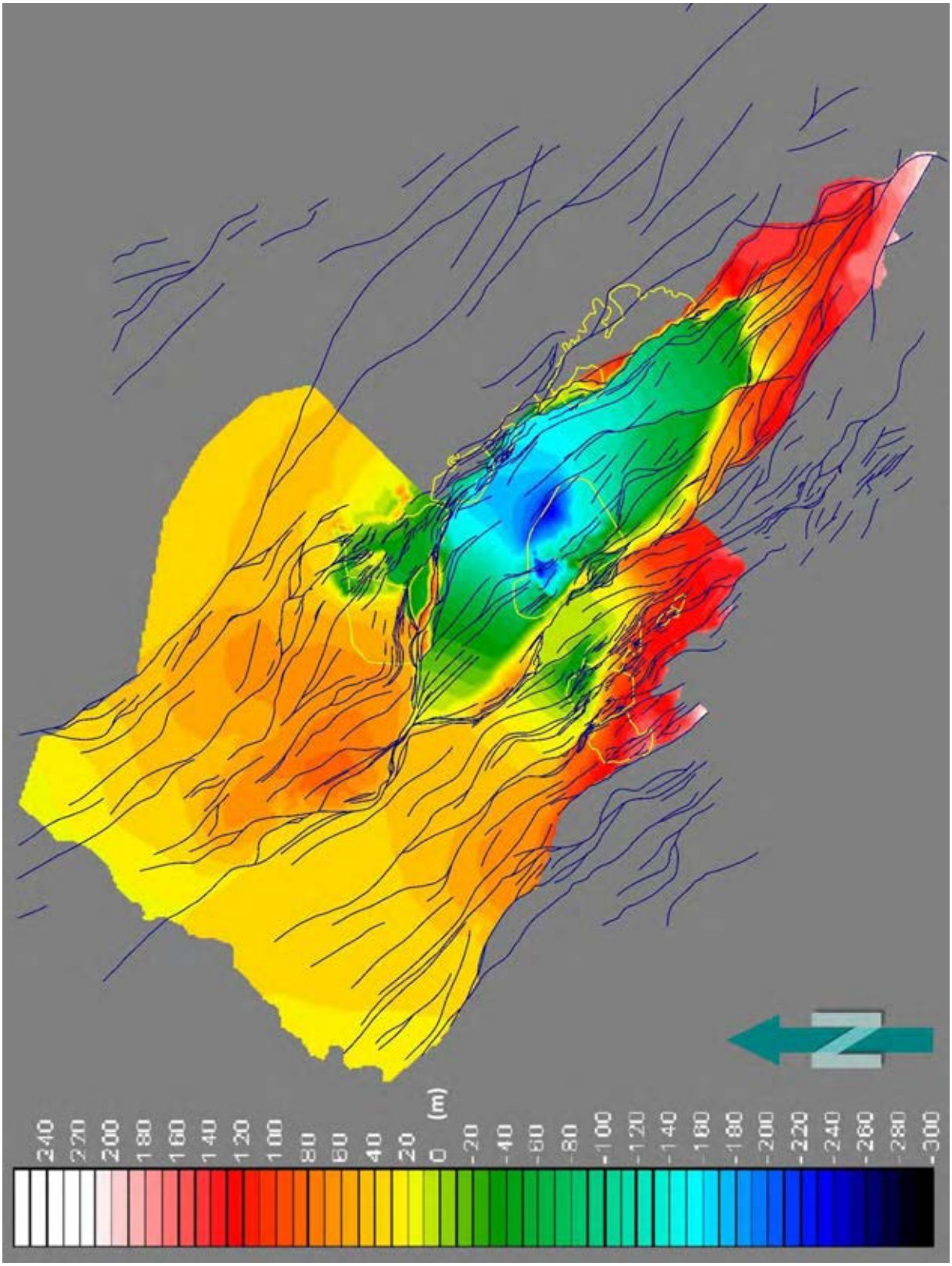


Abbildung 50 – Reviermodell (2005) des Dritten Grundwasserstockwerks (Hauptkiesserie, Horizonte 7 bis 8). (Zusammengestellt aus Unterlagen in Gumm 2011, Erftverband 2015, nach RWE Power AG)

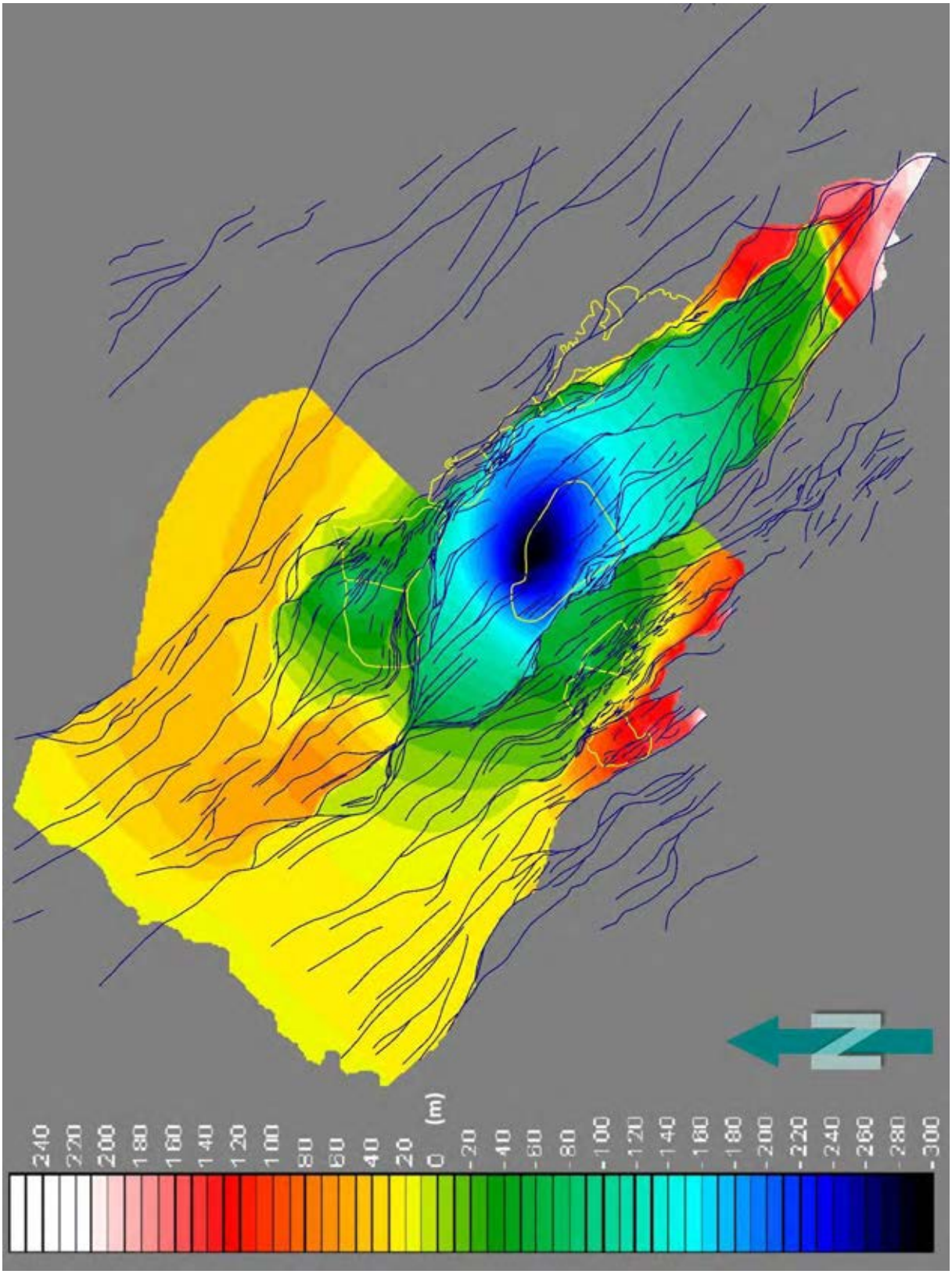


Abbildung 51 – Reviermodell (2005) des Vierten Grundwasserstockwerks (Liegend-Grundwasserleiter, Horizont 5). (Zusammengestellt aus Unterlagen in Gumm 2011, Erftverband 2015, nach RWE Power AG)

Zwischenfazit Grundwassermodelle

Die Grundwassermodelle sind wichtige Hilfsmittel zur Beurteilung der hydrogeologischen Zustände und Entwicklungen, sind aber noch immer durch technische Einschränkungen (Rechenleistung) in ihren Möglichkeiten begrenzt, auch, weil mit zunehmender Rechenleistung die Ansprüche an die Modelle mitwachsen.

Grundwassermodelle können aber auch nur so gut sein wie die einfließenden Daten (Randbedingungen, Durchlässigkeitsbeiwerte, Schichtmächtigkeiten, Porositäten, Aufbau von Kippenmassiven, Tektonik, etc.), sowie die zur Kalibrierung verwendeten Pegelstände bzw. Ganglinien. Ein damit zusammenhängendes Problem liegt in der Behandlung von „hydraulisch aktiven“ Störungen. Hier stellt sich zunächst die Frage, ob die bereits in den empirischen (!) Grundwassergleichen enthaltenen sprunghaften Stufen, wie sie vom Erft-Verband in den Grundwasserkarten der Jahresberichte dargestellt werden, eine reale Grundlage haben können, ob sie also aus den stark instationären Strömungsverhältnissen heraus zu verstehen sind, oder ob sie Artefakte einer Interpretation sind, die sich dann in den Rechenmodellen fortpflanzen.

Im Ergebnis muss daher die Weiterentwicklung der Modelle empfohlen werden. Vor einer unkritischen Verwendung von Modellergebnissen in Entscheidungsprozessen muss jedoch gewarnt werden. Auch bei gut kalibrierten und validierten Modellen sollte immer hinterfragt werden, welche Annahmen in das Modell eingegangen sind und wie diese sich auf das Ergebnis auswirken können. Dies ist bislang aufgrund der restriktiven Informationspolitik der Modell-Betreiber meistens und leider nicht möglich.

Bodensenkungen und Hebungen

Bei einer Abschätzung der Bodensenkungen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen gewachsenen (bergbaulich unverritzten) Böden und bergbaulich veränderten Böden, insbesondere Abraum-Kippen.

Die für die Bodensenkungen verantwortlichen unterschiedlichen Effekte müssen dann hinsichtlich ihrer Schädlichkeit für Bauwerke, Gewässer, Infrastruktur etc. bewertet werden, was in der Regel nur auf Grundlage der konkreten lokalen Gegebenheiten möglich ist. Großräumig einheitlich verlaufende Boden-Senkungen oder -Hebungen sind für Bauwerke generell weniger kritisch als örtlich ungleich verlaufende Bodenbewegungen, die einseitige Belastungen und / oder Schiefstellungen zur Folge haben können. Andererseits sind für die Vernässungsproblematik die großräumigen Bodensenkungen von größerer Relevanz als lokale Effekte.

Bodensenkungen über gewachsenem Boden

Für den Betrieb eines Tagebaus müssen die verschiedenen Grundwasserstockwerke im unmittelbaren Tagebaubereich entleert und im Liegenden der Tagebausohle entspannt werden (Ziegler 2010; Forkel 2011).

Die Absenkung und ebenso der Wiederanstieg des Grundwasserspiegels ungespannter Grundwasserleiter, bzw. Änderungen der piezometrischen Höhen tieferer Grundwasserleiter, haben eine Reihe bodenmechanischer Konsequenzen, die zu teils reversiblen und teils irreversiblen Bodenverformungen führen.

Folgende, durch die Grundwasserabsenkung aktivierte Effekte sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung:

- Durch den sinkenden Porenwasserdruck verringert sich das Porenvolumen, wodurch es zu Setzungen in den Deckschichten kommt. Dies betrifft sowohl gespannte wie ungespannte Grundwasserleiter.
- Mit weiterem Wasserentzug kommt es zum Verlust des Auftriebs, wodurch das Eigengewicht der entwässerten Sedimente höhere Spannungen an den Kornkontakten verursacht, die zunächst eine elastische Kompression und danach ggf. inelastische Kompaktion des Korngerüstes verursachen. Dies betrifft den belüfteten Teil der Deckschichten. Das liegende, weiterhin wassergesättigte Gebirge erfährt hingegen eine Entlastung, entsprechend dem Gewicht des im Hangenden entfernten Wassers.
- Die Entwässerung und Kompaktion von Braunkohlen und Tonen erfolgt aufgrund geringer hydraulischer Leitfähigkeiten zeitlich verzögert. Eine Umkehrung des Prozesses ist wegen bleibender struktureller Gefügeveränderungen nur in geringem Umfang möglich.
- Neben diesen physikalischen Effekten können auch biologisch-chemische Prozesse des Abbaus organischer Stoffe (Torfe, Mudde, Braunkohlen) zu Substanzverlusten im Boden und damit zu Senkungen führen.

Reversible und irreversible Prozesse

Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels geht die Kohärenz des flüssigen Mediums verloren und damit entfällt im entwässerten Schichtpaket die Wirkung des Auftriebs. Die ins noch grundwassergesättigte Liegende abgetragene Gewichtskraft des entwässerten Schichtpakets entspricht nun nur noch dessen Trockengewicht, zuzüglich des Gewichts von Restporenwasser und Feuchte, das durch den Sättigungsgrad bestimmt ist. Das wassergesättigte Liegende wird entlastet und kann sich dehnen, was zu einer (geringen) Hebungskomponenten führt, die aber von den Senkungen im entwässerten Hangenden aufgrund anderer Effekte überkompensiert wird.

Das drainierte Korngerüst im nicht mehr wassergesättigten Hangenden muss gegenüber dem Zustand unter Auftrieb nun höhere Gewichtskräfte ertragen und wird daher in Richtung der Schwerkraft elastisch zusammengestaucht, in erster Näherung entsprechend dem Hook'schen Gesetz. Diese elastische Kompression führt zu Setzungen und Bodensenkungen, die beim Wiederanstieg des Grundwassers und der Wiederkehr der Auftriebswirkung reversibel sind.

Das tragende Korngerüst der entwässerten Sedimente kann durch die gewichtsbedingte (auftriebslose) Zunahme der Spannungen aber auch irreversibel verformt werden, z.B. durch Zerbrechen von Körnern und Neu-Einregelung der Sedimentpartikel zu einem dichteren Korngefüge. Der hiervon bestimmte Anteil der Setzungen ist permanent, wird beim Grundwasserwiederanstieg also nicht wieder umgekehrt. Da mit zunehmender Absenkungstiefe des Grundwasserspiegels die auf das Korngefüge einwirkenden Verformungskräfte und die davon verursachten irreversiblen Gefügeschäden zunehmen, ist davon auszugehen, dass auch der irreversible Anteil der Bodensenkung proportional zur Grundwasserspiegelabsenkung zunimmt.

Bei gut durchlässigen sandig-kiesigen Sedimenten kann das Porenwasser leicht (schnell) entweichen. Bei Tonen und auch bei Braunkohlen kann das Ausströmen des Porenwassers infolge hoher Strömungswiderstände aber nur langsam erfolgen (entsprechend dem Gesetz von Darcy) und folgt daher dem fallenden Grundwasserspiegel nur zeitverzögert hinterher. In den gering durchlässigen Schichten bleibt daher ein relativer Porenwasser-Überdruck zurück, der nur langsam abgebaut wird. Diese Entwässerungsvorgänge werden in Analogie zu natürlichen Diagenese-Prozessen als weitgehend irreversibel angesehen.

Braunkohle und Torf

Moore sind nach bodenkundlicher Definition Böden mit mehr als 30 Prozent Torfanteil und einer Torfmächtigkeit von mehr als 3 Dezimeter (Paas und Schalich 2005). Torf zeichnet sich aufgrund seines hohen Makroporenanteils durch ein sehr gutes Speichervermögen für Wasser aus. Braunkohlen sind letztlich durch biologische und anschließend unter zunehmender Sedimentbedeckung durch chemische Prozesse (Diagenese) aus Torfen hervorgegangene Kaustobiolithe (brennbare biogene Sedimente). Der Übergang von Torf zu Braunkohle ist fließend und die (arbiträre) Grenze liegt definitionsgemäß bei einem Wassergehalt von 75%.

Viele Eigenschaften der Braunkohle werden vom Wasser- bzw. Feuchte-Gehalt geprägt. Braunkohlen sind durch ihren diagenetisch entstandenen Gehalt an kolloidal vorliegenden Huminsäuren stark hygroskopisch. Aufgrund der vergleichsweise geringen Auflast während der Genese sind Braunkohlen wenig verfestigt und daher stark mikroporös. Dadurch bedingte Kapillarkräfte verstärken die hygroskopischen Eigenschaften weiter (Zimmermann 2010).

Je nach Mächtigkeit der Überdeckung liegt der natürliche Gesamtwassergehalt der rheinischen Braunkohlen zwischen 45 % und 63 % und nimmt je 100 m Tiefe um ca. 3 % ab. Daher ist der Wassergehalt der Flöze in-situ durch Entwässerungsmaßnahmen nur in geringem Umfang zu senken, wie Abbildung 52 zeigt. Der Restwassergehalt der „bergfeuchten“ Braunkohle entspricht fast ihrer Speicherkapazität.

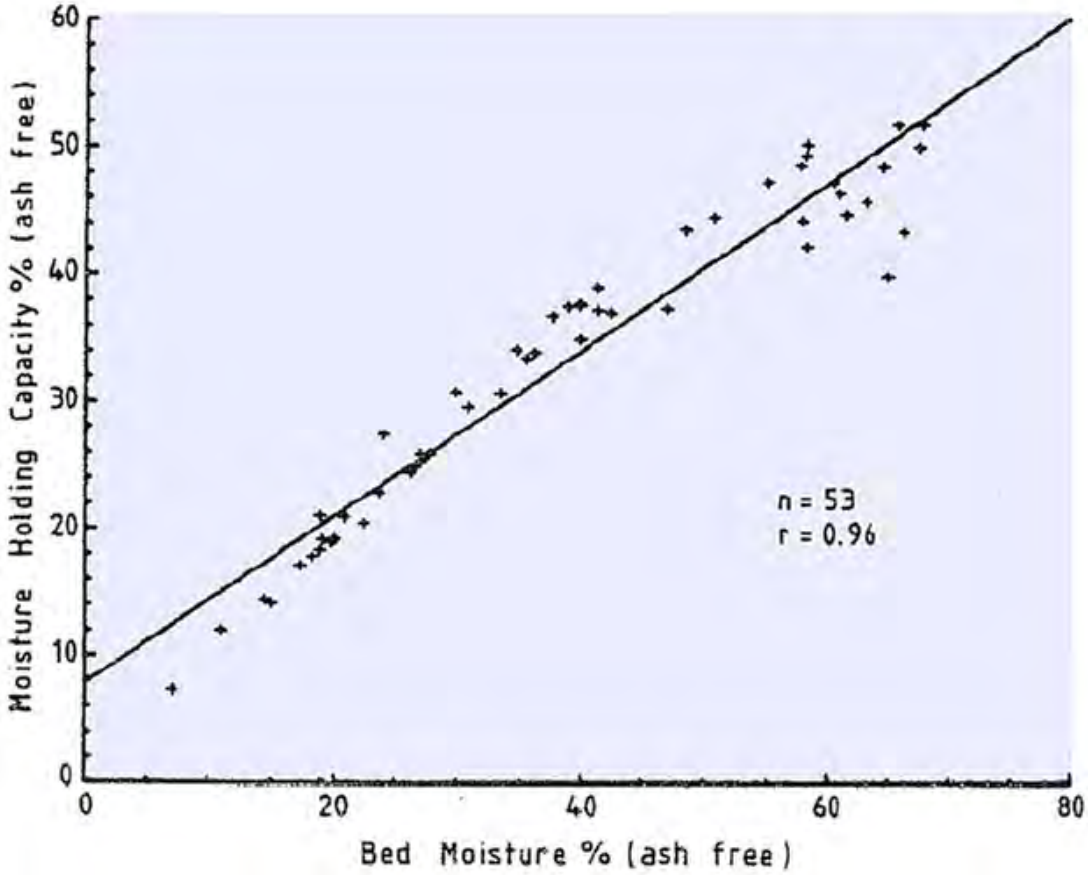


Abbildung 52 – Korrelation der Flözfeuchtigkeit mit der Speicherkapazität für Wasser (Krevelen 1993, aus Zimmermann 2010)

Praktische Erfahrungen bezüglich sümpfungsbedingter Bodenbewegungen

Die hauptsächlich aus dem Grundwasserentzug resultierenden Bodenbewegungen werden durch periodisch wiederholte geodätische Messungen entlang von Leitnivellement-Linien dokumentiert (z.B. Giese 2010; Eichborn 2010). Da die Sümpfung für die aktiven Tagebaue, insbesondere für den Tagebau Hambach, weiter in vollem Gange ist, werden in fast allen Teilen des Braunkohlenreviers die Grundwasserstände der tieferen Grundwasserleiter weiter sinken. Erfahrungen mit ansteigenden Grundwasserspiegeln sind bisher kaum vorhanden (Ausnahmen: Tagebaue Ville und Zukunft-West).

Abbildung 53 zeigt ein (leider nicht aktuelles) Längsprofil (NW-SE), ausgehend vom Tagebau Garzweiler I, nach Südosten der Erftscholle bis Heimerzheim folgend. Die Entwicklung der Bodensenkungen ist für den Zeitraum 1969 bis 1995 dargestellt und zeigt das räumliche Senkungsmaximum im Raum Bergheim, wobei sich die Senkungsbeträge seither auf fast 5 Meter verdoppelt haben und weiter ansteigen werden.

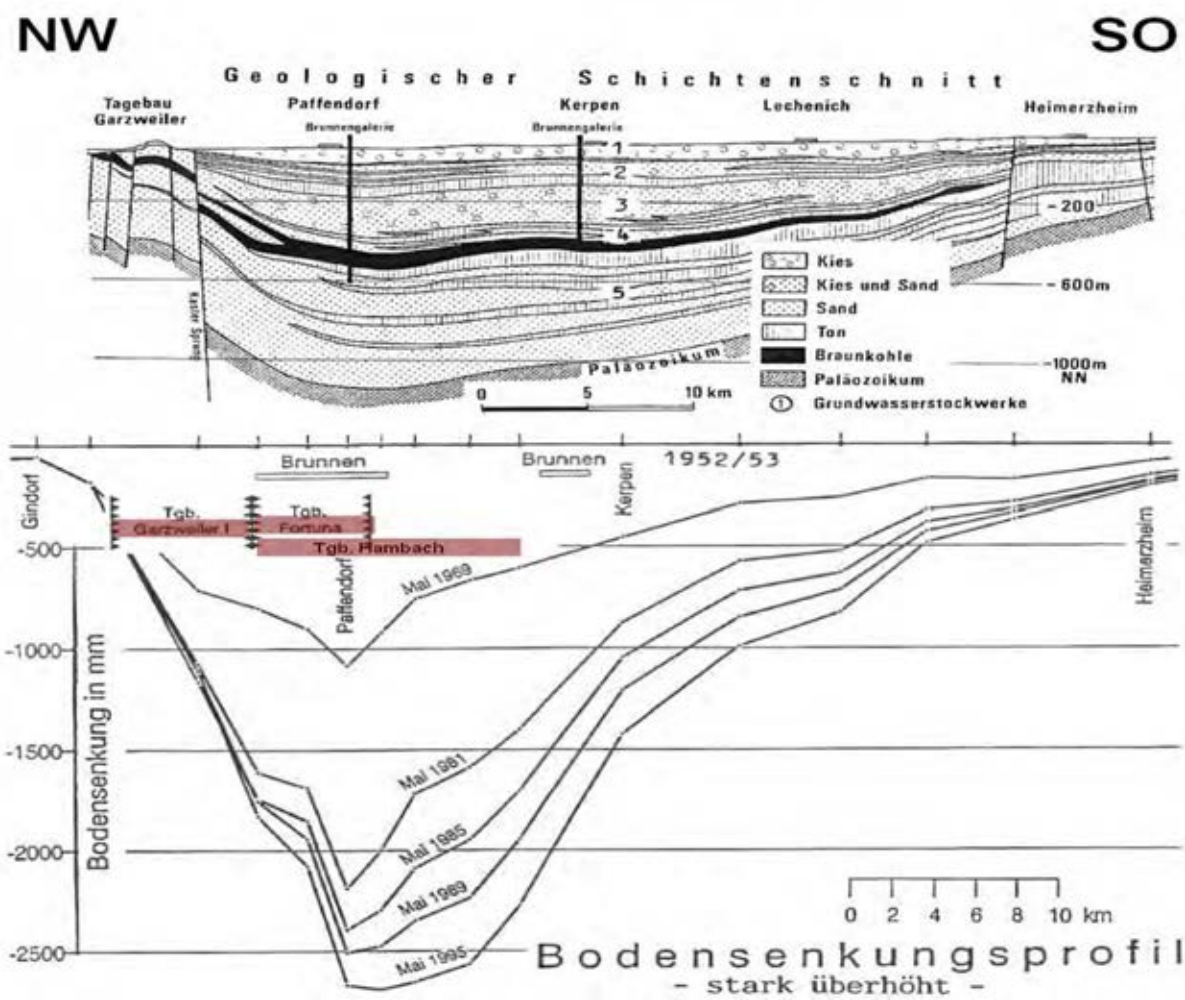


Abbildung 53 – Längsprofile durch das Rheinische Revier. Oben: Geologischer Schnitt. Unten: Gemessene Bodensenkungen von 1969 bis 1995 gegenüber 1952/1953 entlang des gleichen Profils. Lage und Ausdehnung der Tagebaue Garzweiler I, Fortuna und Hambach sind markiert. (Ergänzt und umgestaltet, nach Abbildungen aus Kratzsch 1997)

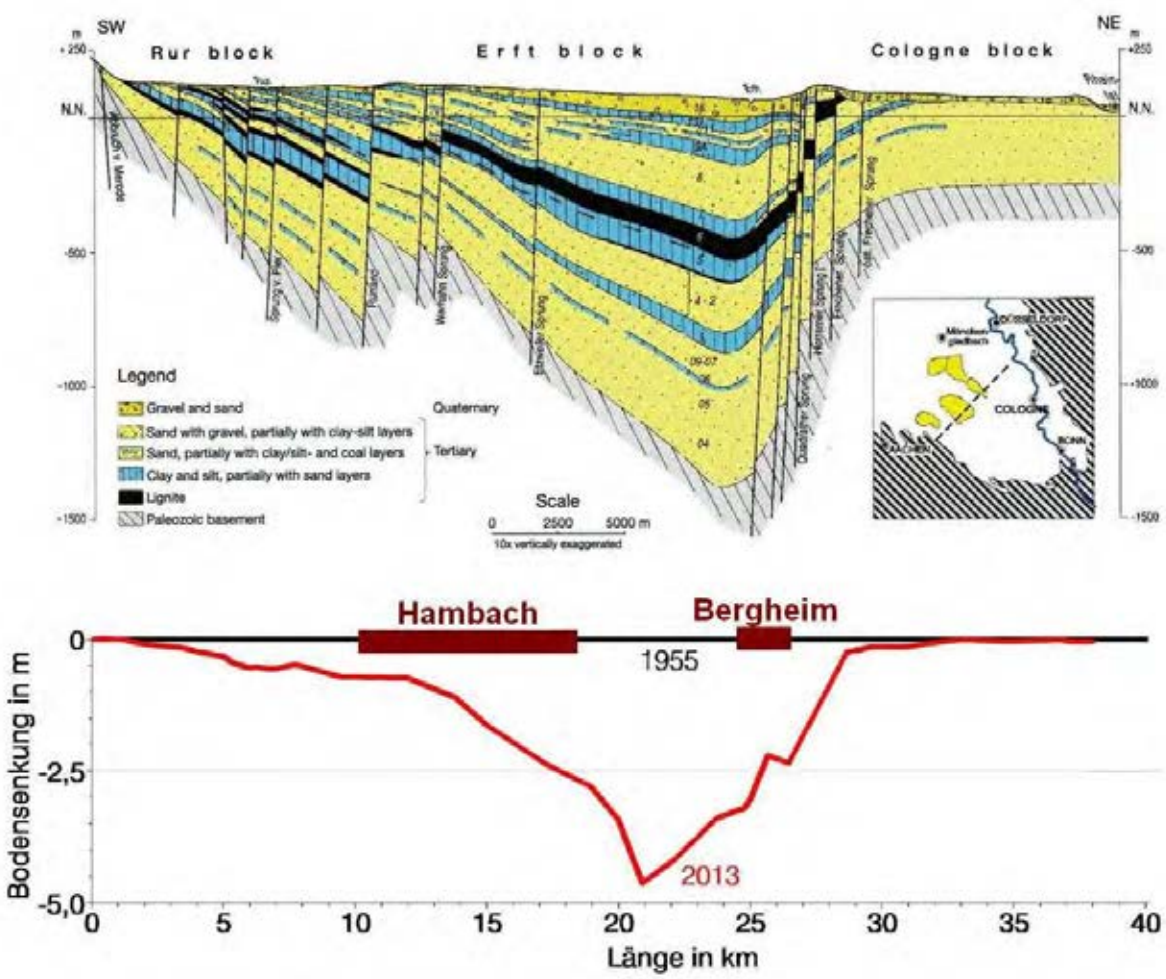


Abbildung 54 – Querprofile durch das Rheinische Revier. Oben: Geologischer Schnitt und Index-Karte. Unten: Gemessene Bodensenkungen 2013 gegenüber 1955 entlang des gleichen Profils. Lage und Ausdehnung der Tagebaue Hambach und Bergheim sind markiert. (Ergänzt und umgestaltet, nach Abbildungen in Poths 2014)

Auch aus dem Querprofil (SW-NE) in Abbildung 54 ist ersichtlich, dass die tiefsten Bodensenkungen von derzeit bereits über 4 Meter zwischen den älteren Tagebauen Bergheim (sowie Fortuna-Garsdorf) und dem jüngeren Tagebau Hambach auftreten. Planmäßig soll der Tagebau Hambach sein tiefstes Sümpfungsziel von ca. 450 m (-365 m NHN) erst gegen 2030 erreichen (Vgl. Tabelle 3).

In Abbildung 55 sind gemessene und prognostizierte Bodensenkungen und Grundwassersenkungen beispielhaft gegenüber gestellt (Ziegler 2010). Leider ist auch hier die Lage der Messstelle nicht spezifiziert, doch ist aus der maximalen Grundwasserabsenkung für die Horizonte 2 bis 5 (Liegendgrundwasserleiter) von ca. 350 m (-280 m NHN) abzuleiten, dass diese Messstelle im damaligen (2010) Absenkungs-Maximum liegen muss (Vgl. Abbildung 39). Extrapoliert man die Bodensenkungen aus Abbildung 55 auf das maximale Absenkungsziel für Horizont 5 von 450 m (-365 m NHN), so ergeben sich maximale Bodensenkungen von wenigstens 6,3 Meter. Demgegenüber sind die prognostizierten Bodenhebungen beim Wiederanstieg des Grundwassers in der Nachbergbau-Ära (Abbildung 55) nur gering (Ziegler 2010).

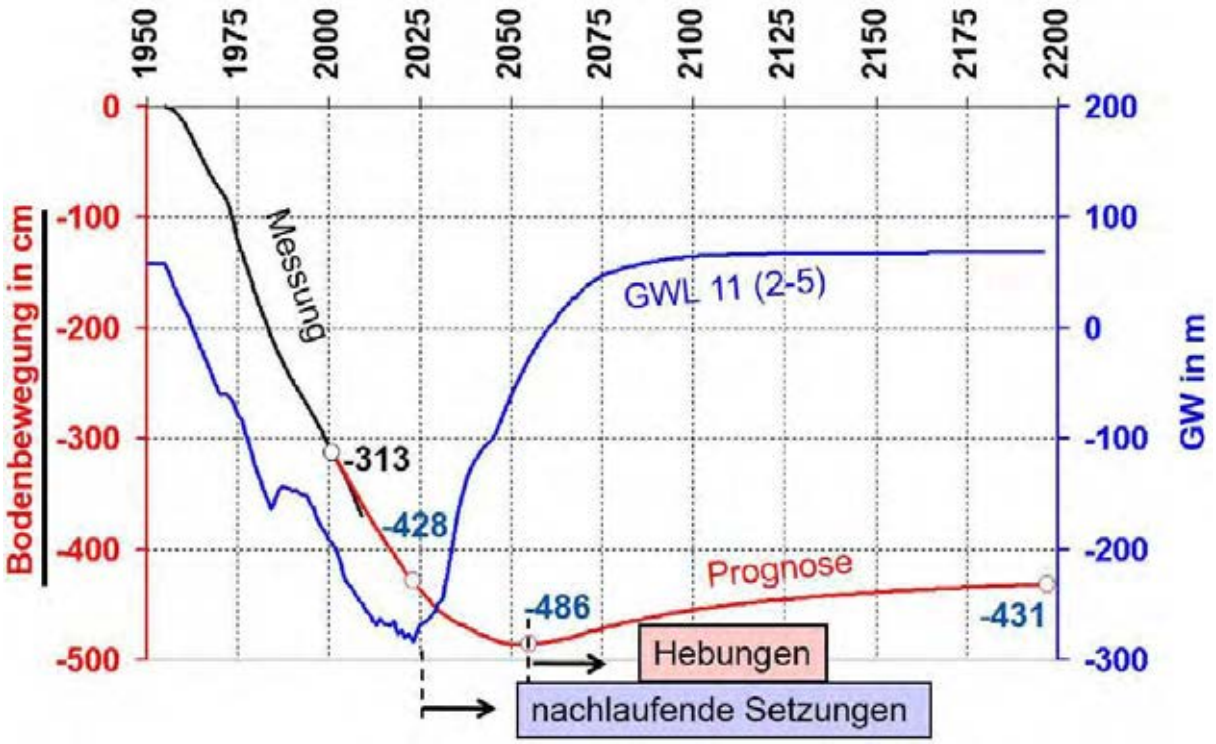


Abbildung 55 – Gemessene und prognostizierte Grundwasser-Ganglinien (blau) und Bodenbewegungen (schwarz, rot) für einen Messpunkt auf der Erftscholle. (Aus Ziegler 2010)

Graphische Darstellungen oder Gegenüberstellungen von Zeitreihen der Grundwasserabsenkungen und Bodenabsenkungen, ähnlich der in Abbildung 55, sind in der Literatur zahlreich zu finden (z.B. Giese 2010; Preuß und Schulte 2012; Ziegler et al. 2009; Ziegler 2010), jedoch fast nie mit Ortsangaben, wie es der guten wissenschaftlichen Praxis entsprechen würde.

Im bisherigen Absenkungsmaximum bei Elsdorf sind bis 2013 bereits Bodensenkungen bis 4,6 Meter durch Nivellements empirisch nachgewiesen. Die Kartendarstellung in Abbildung 56 zeigt grob die flächenmäßige Verteilung der bis 2013 nachgewiesenen Bodensenkungen. Durch die fortschreitende Grundwasserabsenkung bis zum Ende des Braunkohlenbergbaus (Hambach: 2045) werden die Bodenabsenkungen den derzeitigen Höchstwert noch deutlich überschreiten.

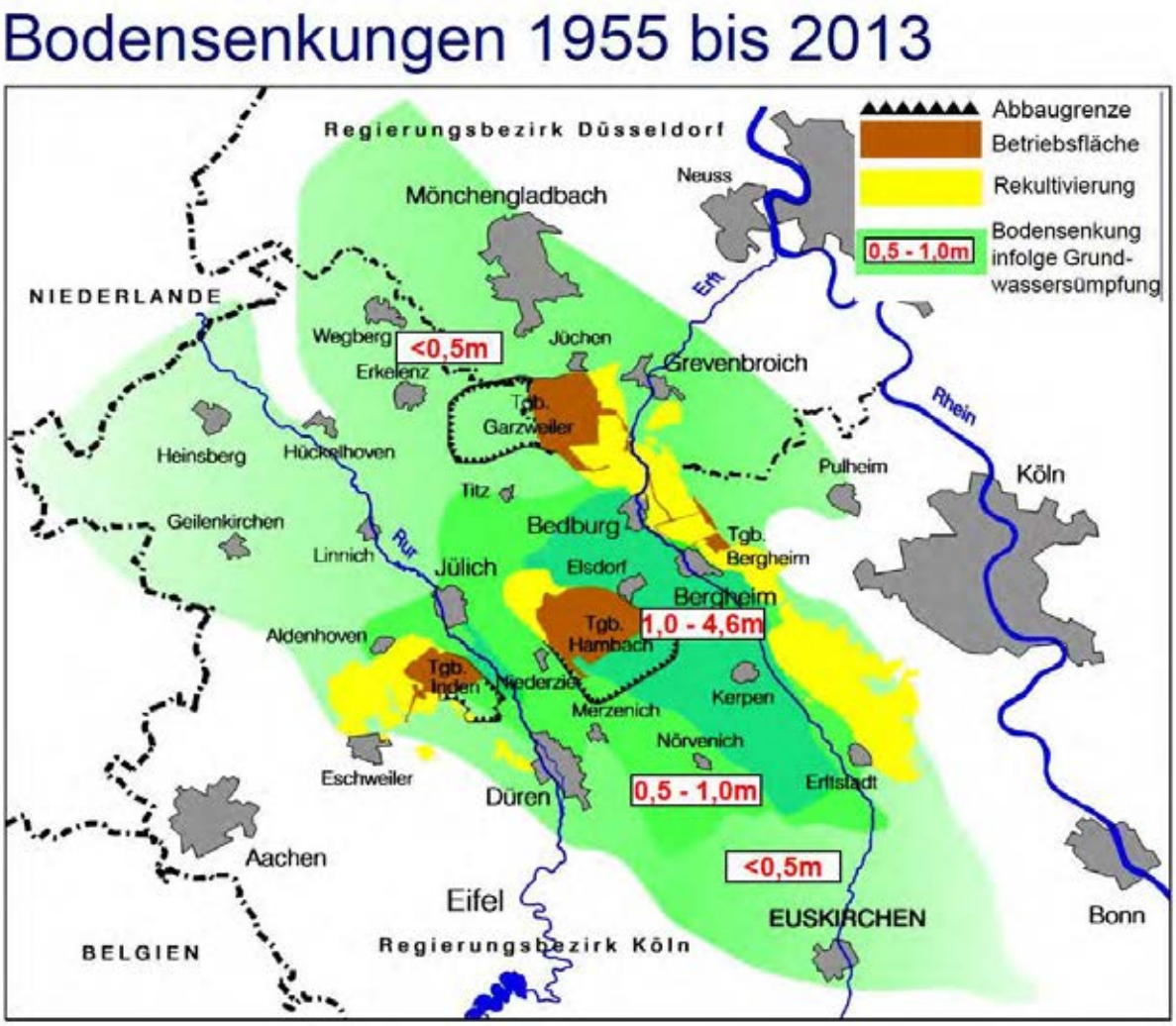


Abbildung 56 – Gemessene Bodensenkungen infolge von Grundwasserabsenkungen, von 1955 bis 2013 (nach Poths 2014)

Nach Auskunft der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen (NRW, 2013) sollen die bisherigen Erfahrungen mit Bodensenkungen durch Grundwasserentzug zeigen, dass der Senkungsbetrag der Oberfläche etwa ein Prozent (10 Promille) der Grundwasserabsenkung ausmacht. Als Beispiel werden die beobachteten Bodensenkungen um 4 Meter in der Nähe von Bergheim angeführt, die auf die Sümpfung des Tagebaus Hambach bezogen werden, leider ohne nähere Angaben über den genauen Ort und den Zeitpunkt.

Schaefer (2006) nennt hingegen „Faustzahlen“, wonach für „Mittelfristprognosen“ die Bodensenkungen 1 bis 3 Promille der Grundwasserabsenkung betragen sollen.

Ein bei RWE Power *„mit Erfolg“* (Ziegler et al. 2009) verwendetes Prognosemodell geht von 1 bis 5 Promille Bodenabsenkung relativ zur Grundwasserabsenkung aus.

Eichborn (2010) hat sich im Rahmen seiner Masterarbeit mit den sümpfungsbedingten Bodensenkungen auseinandergesetzt und aus einer Analyse der periodisch wiederholten Feinnivellements u.a. die Senkungsgeschwindigkeiten ermittelt (Abbildung 57). Die negativen (nach unten gerichteten) Geschwindigkeiten östlich des Tagebaus Hambach liegen im Maximum bei 80 mm/Jahr, östlich des Tagebaus Inden zwischen 10 und 35mm/Jahr und westlich des Tagebaus Garzweiler bei maximal 15mm/Jahr.

Für einen Zeitraum von 2010 bis 2045 (projektiertes Ende des Braunkohlenabbaus) lassen sich auf dieser Grundlage für den Ostrand des Tagebaus Hambach weitere Absenkungen bis zu (35a * 80mm/a = 2800mm) 2,8 Meter prognostizieren, die zu den bereits gemessenen 4,6 Meter hinzukommen könnten, in Summe somit Absenkungen bis 7,4 Meter. Dieser Gesamtbetrag von 7,4 Meter dürfte eine maximale Obergrenze darstellen, weil damit zu rechnen ist, dass die Senkungsgeschwindigkeiten nicht bis 2045 konstant bleiben, sondern etwa ab 2030 (Erreichung der größten Abbautiefe) abklingen werden.

In Abbildung 57 wurden vom Verfasser auf die Originalabbildung aus Eichborn (2010) unter anderem auch die Grundwassergleichen für den Liegendgrundwasserleiter (Horizont 5) für 2013 projiziert. Im Braunkohlenrevier korrespondieren diese Grundwassergleichen sehr gut mit den aus Nivellements abgeleiteten Bodensenkungs-Geschwindigkeiten (türkis bis dunkelblaue Farbcodierungen). Demgegenüber lassen die gelb codierten Hebungsgebiete in den Aachener und Erkelenzer (Wassenberger Horst) Steinkohlenrevieren keine Korrespondenz zu den Grundwassergleichen erkennen.

Weiterhin ist aus Abbildung 57 deutlich die trennende Wirkung der Verwerfungszone zwischen der Erft-Scholle und der Kölner Scholle zu erkennen. Im Bereich der älteren Tagebaue entlang des Ville-Höhenzugs sind lokal sogar leicht gelbgrüne Farbtöne dargestellt, die sehr geringe positive Geschwindigkeiten und somit Hebungen signalisieren, die wahrscheinlich den reversiblen Anteil der Bodensenkungen repräsentieren.

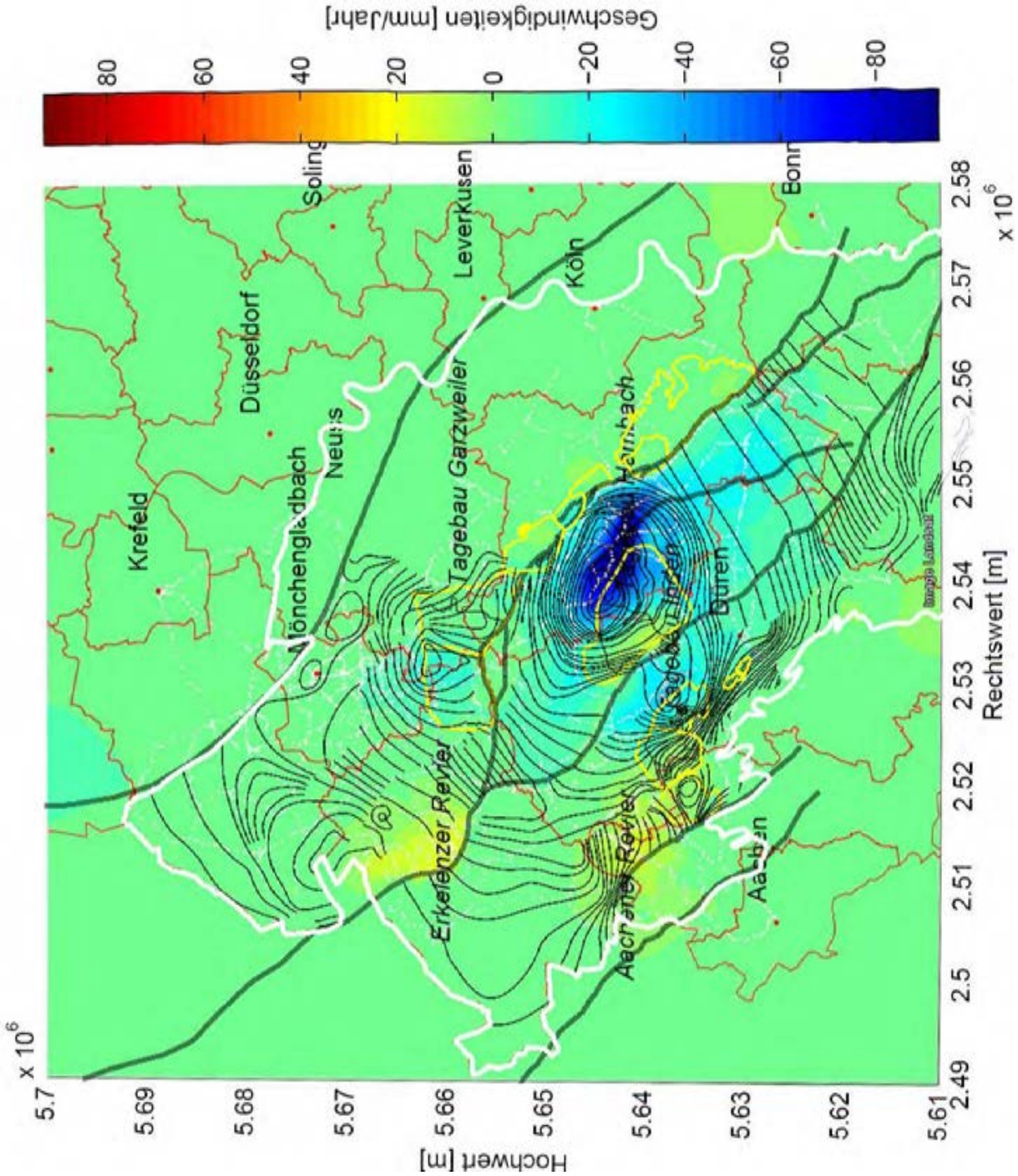


Abbildung 57 – Senkungsgeschwindigkeiten im Jahr 2010 (Farbskala in mm/a). (Nach Eichborn 2010) (Vom Verfasser ergänzt: Hauptverwerfungen, Arbeitsgebietsgrenze, Braunkohlenabbaue und Grundwassergleichen für Horizont 5, 2013.)

Ein ganz anderer wissenschaftlicher Ansatz besteht in der Anwendung der Satelliten-Fernerkundung mit Radarinterferometrie (InSAR). Dabei werden aus dem Orbit kurze Radar-Pulse ausgesendet und, nach Reflexion an der Erdoberfläche, wieder empfangen. Aus der Laufzeit wird die Entfernung zu einem lokalen Reflektor („Permanent Scatterer“) bestimmt. Dieser Vorgang wiederholt sich in nachfolgenden Orbits. Aus Veränderungen der Laufzeit (Phase der Radarwellen) können Veränderungen der Entfernung Satellit – Permanent Scatterer ermittelt werden, und daraus wiederum zeitliche Höhen-Änderungen des Reflektors zwischen den Orbits. Aus den Daten vieler Reflektoren lassen sich Karten der Bodenbewegungen und der Bodenbewegungs-Geschwindigkeiten erstellen.

Kircher (2004) hat sich im Rahmen ihrer Dissertation mit Bezug auf das Rheinische Braunkohlenrevier mit dieser Methode beschäftigt. Die Ergebnisse entsprechen trotz geringer Differenzen jenen aus den Nivellement-Messungen.

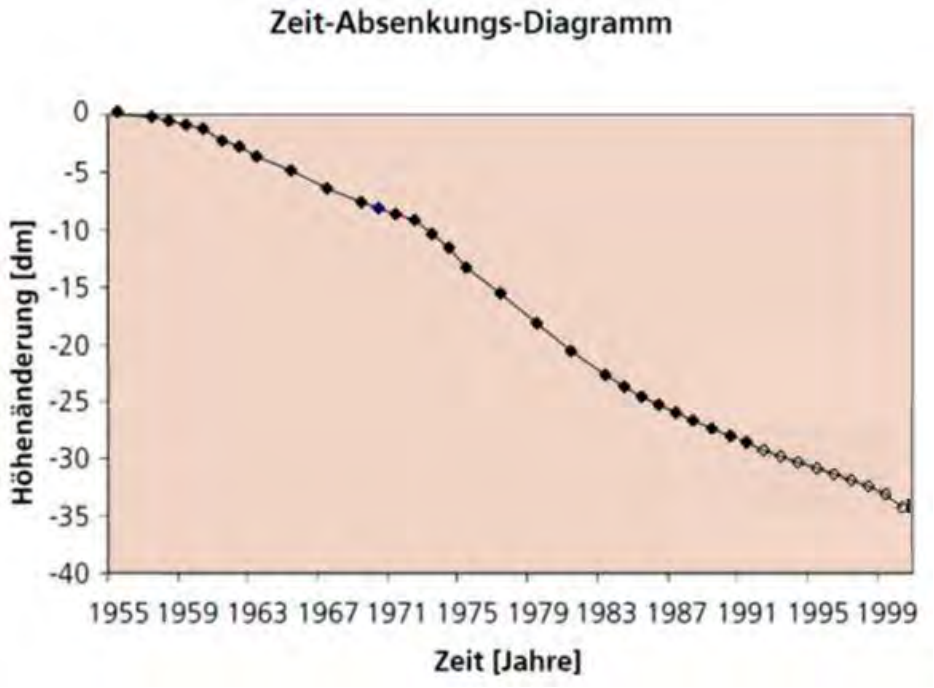


Abbildung 58 - Bodenabsenkungen (aus Nivellements) seit 1955 im Zentralbereich des Absenkungstrichters. (Umgestaltet, nach Kircher 2004)

In Abbildung 58 ist ein Zeit-Absenkungs-Diagramm für die Bodenabsenkungen seit 1955 im Zentralbereich des Absenkungstrichters wieder gegeben (leider ohne exakte Ortsangabe). Man erkennt Senkungsbeträge bis ca. 3,5 m im Jahr 2000. Darüber hinaus ist ein insgesamt fast linearer Absenkungstrend erkennbar, der im Detail jedoch mehrere Phasen mit unterschiedlichen Senkungsgeschwindigkeiten erkennen lässt. Diese Abschnitte werden in Zusammenhang mit den einsetzenden Sümpfungsaktivitäten für den Tagebau Hambach (Mitte der 1970er Jahre) und auslaufenden Sümpfungsaktivitäten für die Tagebaue Fortuna-Garsdorf und Bergheim (1990er Jahre) gesehen.

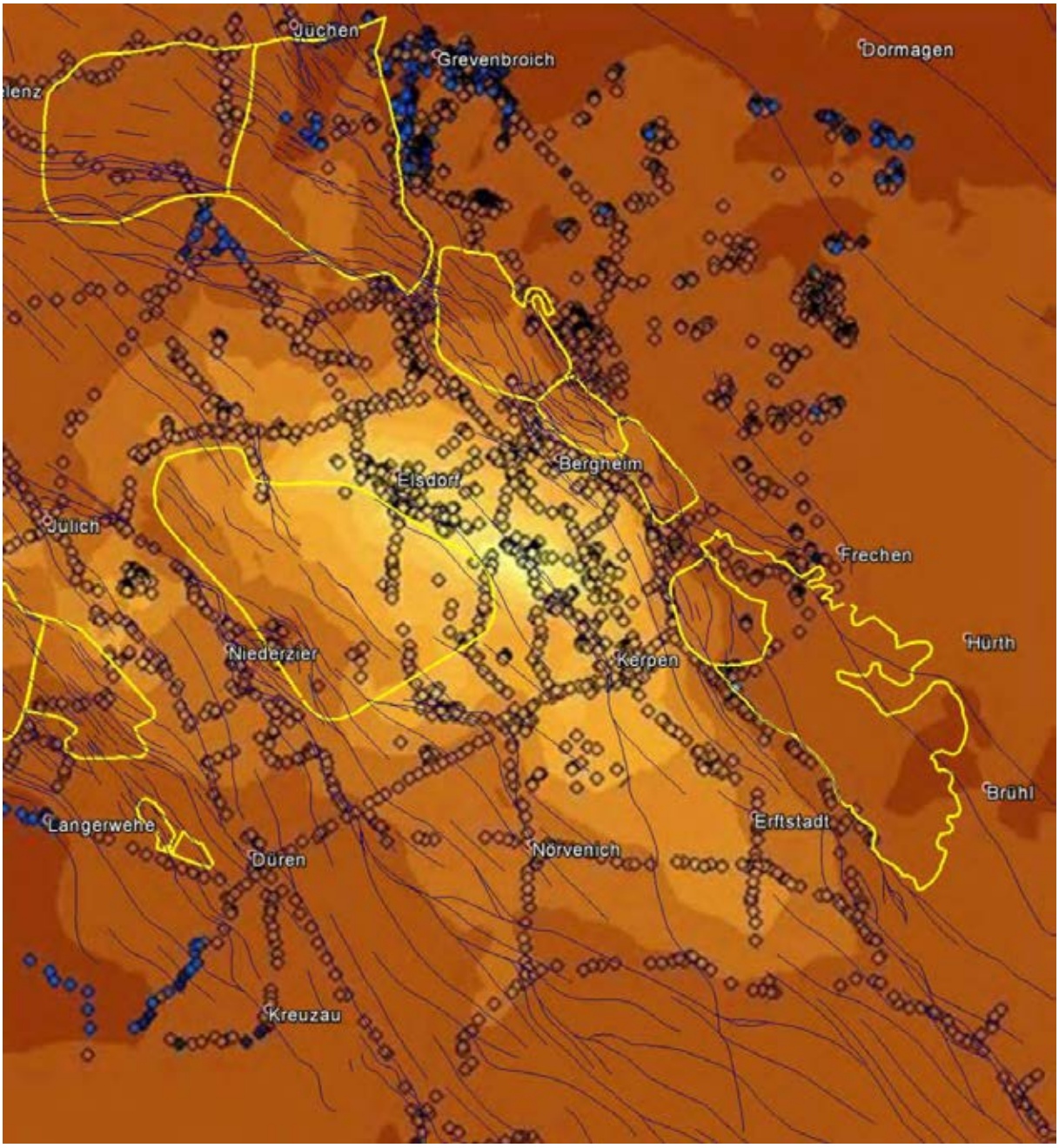


Abbildung 59 – Senkungsgeschwindigkeiten. Interpolierte Karte aus der Kombination von Permanent Scatterer und Nivellementpunkten. Farbskala in Schritten von 10 mm/a. Dunkelbraun: 0-10 mm/a; hellgelb 90-100 mm/a. Nach Kircher (2004). Vom Verfasser ergänzt: Lage der Tagebaue, Ortsbezeichnungen, Störungslinien (nach Erftverband 2015).

Abbildung 59 wurde auf Grundlage von Ergebnissen aus Kircher (2004) erstellt. Es ist zu erkennen, dass die höchsten Senkungsraten von 90 bis 100 mm/a bereits im Zeitraum 1992 bis 2000 am Ostrand des Tagebaus Hambach (Ortslage Heppendorf) festzustellen waren. In diesem Bereich ist auch das spätere Absenkungsmaximum zu erwarten.

Hinweis auf Bodenbewegungen durch Steinkohlenbergbau

Obwohl nicht Gegenstand dieser Studie, soll an dieser Stelle kurz auf die Bodenbewegungen infolge der Flutung der Erkelenzer und Aachener Steinkohlereviere eingegangen werden, weil diese sich teilweise mit dem Braunkohlenrevier räumlich überdecken. Bei den Steinkohlenbergwerken treten bei Flutung überwiegend Hebungen des Bodens auf, die zudem geringere Beträge haben als die Bodenbewegungen in Zusammenhang mit Braunkohletagebauen.

Aachener Revier:
Das Steinkohlenfeld „Emil Mayrisch“ (1992 stillgelegt) unterlagert in Tiefen von ca. -600 m bis -800 m NHN den Nordteil des Braunkohlentagebaus Zukunft-West, und das östlich angrenzende Steinkohlenfeld „Norbert Metz“ reicht in Tiefen unter -1000 m NHN an den Nordwestrand des Braunkohlenfeldes Inden I heran.

In Abbildung 60 ist die Entwicklung der Bodenbewegungen im Aachener/Süd-Limburger Revier in den Zeitabschnitten von 1974-1993, 1993-2005 und 2001-2009 dargestellt (Rosner 2011). Während in den 1970er bis 1980er Jahren noch starke Bodensenkungen nördlich der Tagebaue Zukunft-West und Inden I stattfanden, kehrten diese sich mit Beginn der Flutung 1995 in Hebungsbewegungen um. Die Hebungen erfassen scheinbar auch noch Teile der Kippe Zukunft-West, doch sollen diese mit der Einstellung der Sümpfung dieses Tagebaus und der Flutung des Blausteinsees zusammenhängen (Rosner 2011). Die Flutung der Steinkohlenbergwerke im östlichen Aachener Revier dauert teilweise noch an.

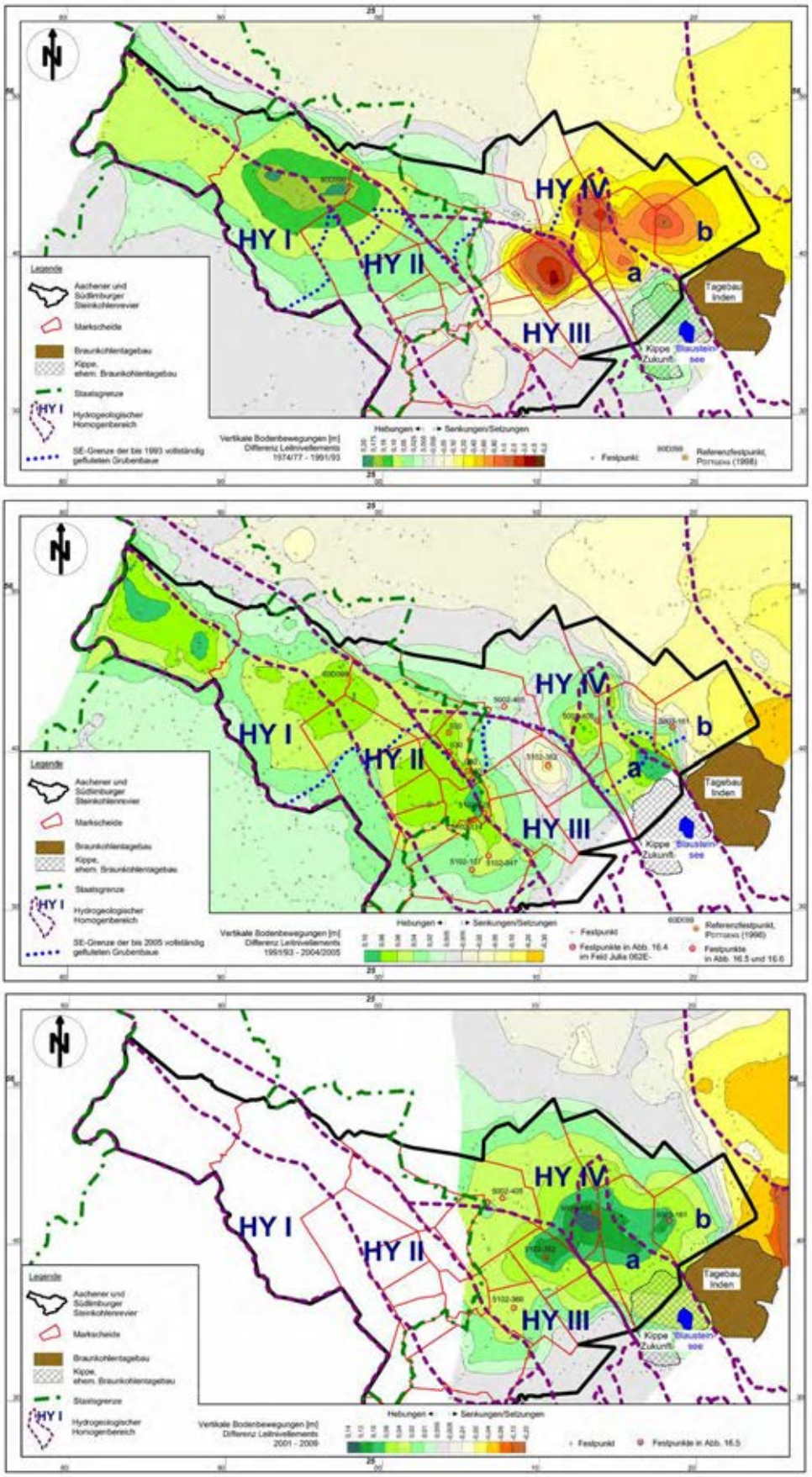


Abbildung 60 – Entwicklung der Bodenbewegungen über dem Aachener Steinkohlenrevier. Aus Rosner (2011)

Erkelenzer Revier:
Der Steinkohlenbergbau der Zeche Sophia-Jacoba bei Hückelhoven ist an den „Wassenberger Horst“, eine lokale Hochscholle am Rande der Rurrand-Verwerfung, gebunden (Abbildung 61). Die Flutung der Steinkohlegrube hat 1997 begonnen und war 2009 weitgehend abgeschlossen. Im Erkelenzer Revier wurden bis 2005 Bodenhebungen bis zu 0,15 m ermittelt. Hier traten auch massive Bergschäden aufgrund markanter Hebungsdifferenzen auf (Rosner et al. 2014).

Das Erkelenzer Revier deckt sich mit dem Südteil des Naturparks Schwalm-Nette und liegt im Bereich extensiver Maßnahmen zur Grundwasseranreicherung. Das Erkelenzer Revier liegt im nordwestlichsten Einflussbereich des Absenkungstrichters des Tagebaus Garzweiler II.

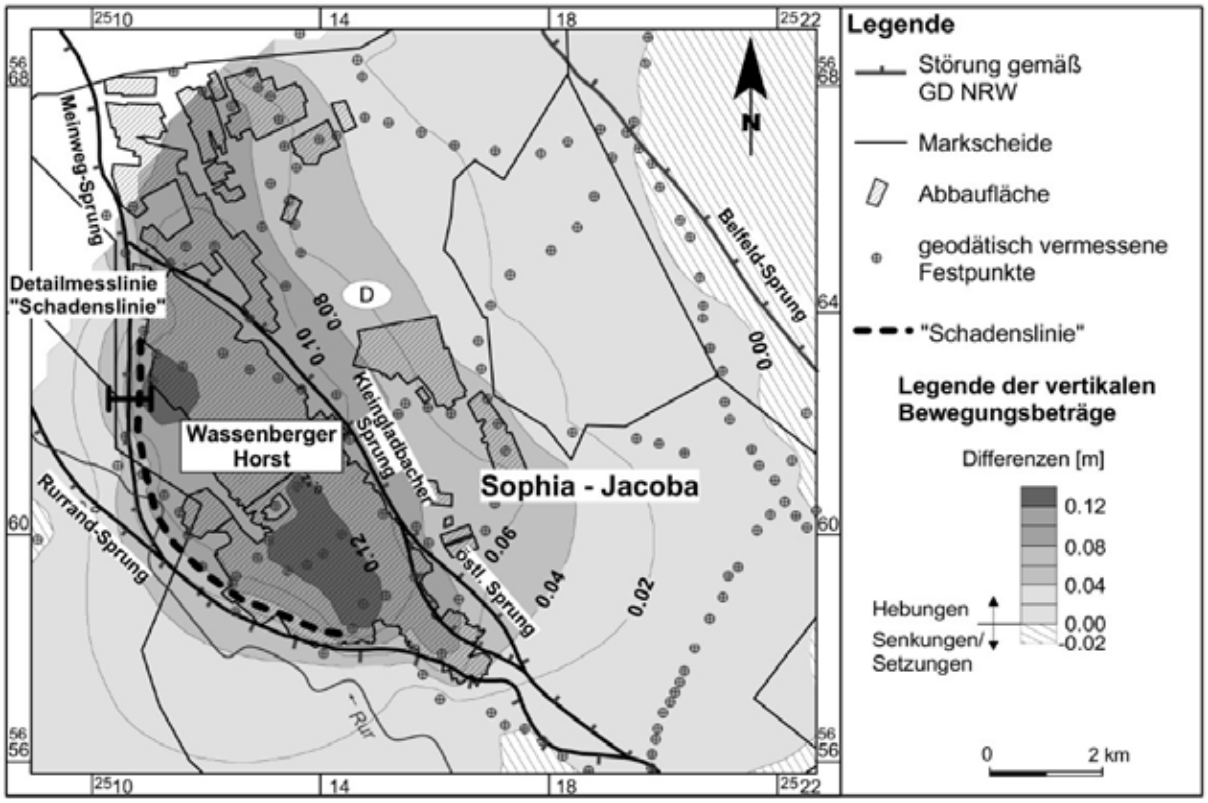


Abbildung 61 – Entwicklung der Bodenbewegungen im Erkelenzer Steinkohlenrevier im Zeitraum 2001 bis 2007. Aus Rosner et al. (2014).

Setzungsstufen

Im Hinblick auf mögliche Bergschäden an Gebäuden sind lokalmaßstäblich insbesondere ungleichmäßige Senkungen bzw. Setzungen des Bodens (Setzungsstufen) von Interesse. Ursachen hierfür können sein:

- Unterschiedliche Entwässerungstiefe oder Entwässerungsraten an Störungen („Sprüngen“).
- Unterschiedliche Setzungen oder Setzungsraten an Rändern von Torflinsen oder Braunkohle-Einschaltungen.
- Unterschiedliche Setzungen oder Setzungsraten an Rändern von ausstreichenden Tonen und Braunkohlen-Flözen oder -Linsen
- Unterschiedliche Setzungen oder Setzungsraten an Kippenrändern.

Störungen (Verwerfungen, Sprünge): Von vielen Störungen der Niederrheinischen Bucht ist bekannt, dass diese hydraulisch aktiv sind, d.h., dass sie die aneinander grenzenden Grundwasserleiter voneinander hydraulisch trennen. Daher kann das Grundwasser links und rechts der Störung unterschiedlich schnell und unterschiedlich tief abgesenkt werden. Somit können auch die Bodenabsenkungen an den Störungslinien unterschiedlich erfolgen, und zwar in der Regel auf der dem Tagebau zugewandten Seite des Sümpfungstrichters stärker als auf der dem Tagebau abgewandten Seite (Mönchengladbach 2010). Eine Übersicht aller bekannten Störungen im Arbeitsgebiet wurde bereits in Abbildung 6 gegeben. Zur Beurteilung konkreter Bauschäden muss die Lage von Störungen allerdings metergenau bekannt sein, so dass Kartendarstellungen in der Regel nur erste Hinweise liefern können. Das heißt, man wird nicht umhinkommen den Störungsverlauf durch Aufschluss oder durch geeignete geophysikalische Messverfahren vor Ort zu erkunden.

Ausstreichende Ton- und Braunkohle-Horizonte: Durch tektonische Schrägstellung und anschließende Erosion der tertiären Schichten kommt es gebietsweise zu Ausbissen grundwasserstauender Braunkohle-Horizonte sowie toniger Horizonte (insbesondere Reuver-Ton und Rot-Ton), zumeist unter einer diskordanten Quartär-Überdeckung. Bei der Sümpfung bleiben über den grundwasserstauenden Schichten schwebende Grundwasserkörper erhalten, während jenseits ihrer Verbreitung der Grundwasserspiegel tiefer absinkt. Auch entlang solcher Ausbisslinien muss mit unterschiedlich starken Bodensenkungen gerechnet werden. Auch hier ist im konkreten Schadensfall eine Erkundung vor Ort erforderlich.

Kippenränder: Auf die Problematik von Eigensetzungen und Sackungen in Kippenmassiven sei aus systematischen Gründen bereits an dieser Stelle hingewiesen. Besonders an Kippenrändern, wo ein sprunghafter Materialwechsel zum gewachsenen Boden vorliegt, muss aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens gegenüber Wasserentzug und Grundwasser-Wiederanstieg mit ausgeprägten Stufenbildungen gerechnet werden (s.u.). Tagebaue und Kippen sind technische Bauwerke, deren Lage und Ausdehnung bei den zuständigen Behörden genau bekannt sind. Es ist daher möglich und sinnvoll eine Bebauung solcher Bereiche nicht zuzulassen oder mit entsprechenden Auflagen zu belegen.

Lokale Torf- und Braunkohle-Linsen: Im Quartär, insbesondere im Holozän sind in Talniederungen und Tümpeln lokal Torfe oder stark humose Böden entstanden, die beim Trockenfallen austrocknen, schrumpfen und nach Luftzutritt aerob abgebaut werden. Mit Torfvorkommen und stark humosen Böden muss besonders im Bereich der heutigen Talauen und in Altarmen von Flüssen gerechnet werden. Siehe Abbildung 62. Unabhängig von der Sümpfungsproblematik sollten im Bereich von Talauen die Baugrundverhältnisse immer sorgfältig untersucht werden.

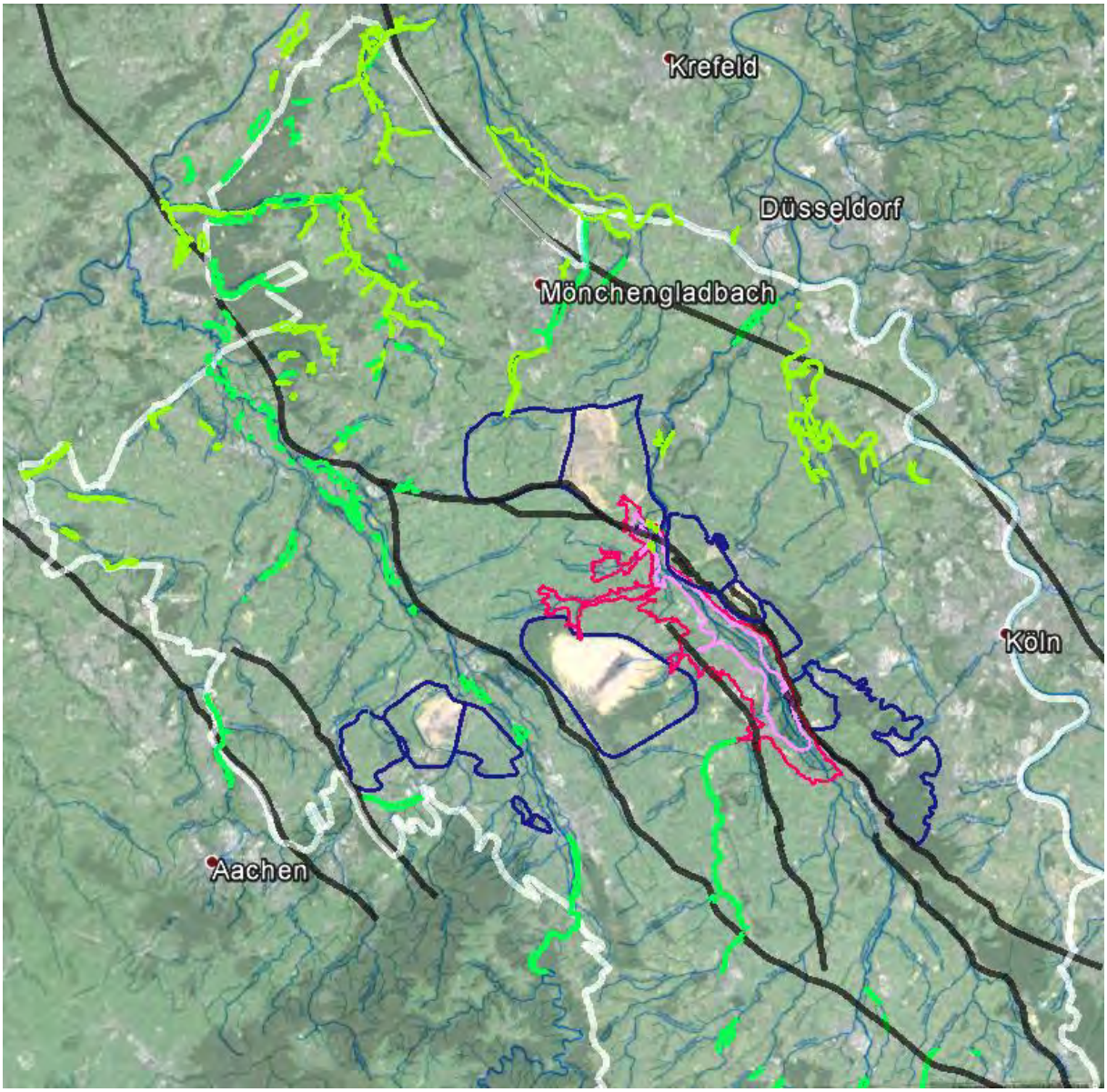


Abbildung 62 – Verbreitung von Torf (gelbgrün) und Grundwasserböden (giftgrün). Erft-Aue mit historischen Grundwasserflurabständen im Jahr 1953 <10m (rot) und <3m (rosa). Tagebau-Umrisse (dunkelblau).

Interessanterweise sind im Bereich der Erft-Aue (Vgl. Abbildung 62) in bodenkundlichen Karten keine Torfvorkommen verzeichnet. Auch hier ist eine gewisse Skepsis angebracht, weil der bodenkundliche Bearbeitungsstand regional sehr unterschiedlich sein kann. Es ist auch

damit zu rechnen, dass wegen der bodenkundlichen Definition von Mooren (Siehe oben) Vorkommen mit weniger als 30 cm Mächtigkeit nicht dargestellt werden. Gleichwohl können auch bereits geringer mächtige Torf-Vorkommen zu Standsicherheitsproblemen führen.

Braunkohlen können in Bereichen, in denen sie infolge der Sümpfungsmaßnahmen belüftet werden, ein ähnliches Schicksal erleiden wie Torfe und austrocknen und aerob abgebaut werden. Neben den Hauptflözen sind geringmächtige und lateral begrenzte Braunkohle-Vorkommen aus dem späten Miozän und Pliozän bekannt (Vgl. Abbildung 13).

Gefälleänderungen

Im Abschnitt zwischen Erftstadt und dem Erft-Durchbruch durch die Ville nördlich von Bedburg legt die Erft auf einer Entfernung von 50 km einen Höhenunterschied von ca. 30 m zurück (entsprechend einem mittleren Gefälle von 1:1.700).

Durch die Bodensenkungen wird gegen Ende des Bergbaus (2030/2045) im Umfeld des Senkungszentrums die Erft nahe Bergheim etwa um 5 m tiefer liegen als im Jahr 1955 (+65m NHN), also auf ca. +60 m NHN. Am Erft-Durchbruch bei Bedburg wird das Vorflut-Niveau der Erft unverändert ca. +58m NHN betragen. Die Entfernung zwischen Bergheim und dem Erft-Durchbruch beträgt 18 km, so dass ein Gefälle von 7 m auf 18 km (1:2.600) im Jahr 1955 einem Gefälle von 2 m auf 18 km (1:9.000) im Jahr 2045 gegenüber steht.

In dem ohnehin gefällearmen Abschnitt der Erft zwischen Bergheim und Bedburg wird sich das Gefälle also weiter deutlich verringern und bezogen auf die wahre Flusslänge nur noch ca. 1 Meter auf 10 Fluss-Kilometer betragen. Dies sind fast stagnierende Verhältnisse. In Hochwasserphasen muss daher auch mit stark zunehmenden Wasserständen, Ausuferungen und Überschwemmungen gerechnet werden. Ob in Hochwasserperioden die Wasserhaltungsmaßnahmen überhaupt in der Lage sein werden, Überschwemmungen zu verhindern, ist fraglich, hängt aber letztlich von der Leistungsfähigkeit der Wasserhaltung ab.

Überdies wird sich eine verstärkte Tendenz zur Verschlammung des gefällearmen Abschnitts der Erft einstellen.

Zwischenfazit sümpfungsbedingte Bodensenkungen:

Eine der Kernaussagen der Antwort der Landesregierung (NRW 2013) auf eine große Anfrage lautete:
„Eine Vernässung ist durch die Bodenbewegungen nicht zu befürchten. Die Absenkung des Grundwasserspiegels um große Beträge führt zu einer verhältnismäßig geringen Bodensenkung (in grober Abschätzung ist der Betrag der Grundwasserabsenkung etwa um den Faktor 100 höher als der Betrag der Bodensenkung). Auch die maximal schon beobachteten Bodenbewegungen im nahen Umfeld des Tagebaus Hambach im Bereich Bergheim von etwa 4 Meter stellen dort keine erhebliche Gefährdung dar, wo die Bodenbewegung langsam und gleichmäßig erfolgt. Beim Wiederanstieg des Grundwasserspiegels kommt es gleichzeitig zu einer Geländehebung, bei der voraussichtlich nicht wieder ganz die ursprüngliche Geländehöhe erreicht wird, da die Sedimentsackungen nur teilweise reversibel sind."

Bezüglich des Verhältnisses von Bodensenkung zu Grundwasserabsenkung von etwa 1 % („Faktor 100") dürfte die Landesregierung näher an der Realität liegen als die oben bereits zitierten Quellen, die von Promillebeträgen ausgehen. Setzt man die Bodensenkungen zu den Grundwasserabsenkungen im Bereich ihrer Maximalwerte ins Verhältnis, so kommt man eher zu Werten von 1,4 bis 1,5 %.

Die weiteren, etwas beschwichtigend wirkenden Bewertungen in obigem Zitat (NRW 2013) können vom Verfasser allerdings nicht geteilt werden, denn:

- Man sollte sich darüber im Klaren sein, dass Bodensenkungen und Bodenhebungen zeitversetzt stattfinden und sich daher nicht kompensieren, sondern in ihren schädlichen Wirkungen eher verstärken.

- Die sümpfungsbedingten Bodensenkungen werden bis zum Ende der Tagebaubetriebe über die derzeitigen 4 Meter hinaus weiter zunehmen und auch in der Fläche ein Ausmaß erreichen, welches zu erheblichen Nutzungseinschränkungen führen kann und/oder zu dauerhaften Wasserhaltungsmaßnahmen zwingen wird.

- Im Verlauf der Erft wird es zwischen Erftstadt und Bergheim zu weiteren Zunahmen des Flussgefälles und in Folge möglicherweise zu Erosionsprozessen kommen. Im Abschnitt zwischen Bergheim und Grevenbroich wird hingegen das Flussgefälle herabgesetzt, was zu Aufstauungen, Vernässungen und Verschlammungen führen kann (Vgl. Längsprofil, Abbildung 53). Ob dort in Hochwasserperioden die Wasserhaltungsmaßnahmen überhaupt in der Lage sein werden, Überschwemmungen zu verhindern, wird in Frage gestellt.

- Es ist wohl zutreffend, dass die Erft-Aue zwischen Kerpen und Bedburg vor den bergbaulichen Grundwasserabsenkungen ein Sumpfgebiet war, das bereits vor 150 Jahren durch Drainagen und die Begradigung und Eintiefung der Erft trockengelegt wurde. Ebenso, dass dann in den 1950er-Jahren durch die großräumige Grundwasserabsenkung die Voraussetzungen für eine dichte Besiedlung geschaffen wurden, die auch künftig Bestand haben soll. Allerdings stellt die Landesregierung (NRW 2013) fest: *„Der planungspolitische Konsens für Maßnahmen zur dauerhaften*

Niedrighaltung von Grundwasserständen in der Erftaue (Abschnitt zwischen Kerpen und Bedburg) ist nicht vertraglich vereinbart worden."

- Die Niedrighaltung der Grundwasserstände wird nur durch eine Weiterführung des Grundwassermanagements zu erreichen sein. Bei RWE rechnet man mit jährlich zu hebenden Wassermengen bis ca. 100 Mio. m³/a (Forkel, mündl. Mitteilung am 17.04.2015), bzw. 80 bis 100 Mio. m³/a (Rinaldi, mündl. Mitteilung am 07.05.2015).

- Der entscheidende Punkt ist aber, dass die großräumige und weitgehend irreversible Bodenabsenkung um mehrere Meter eine Folge der tiefreichenden Sümpfungsmaßnahmen für die Braunkohlen-Tagebaue ist. Diese irreversible Absenkung um mehrere Meter gegenüber dem vorbergbaulichen Zustand wird zusätzliche Wasserhaltungsmaßnahmen notwendig machen, die weit über das zur Erhaltung der vorbergbaulichen Grundwasser-Flurabstände notwendige Maß hinausgehen dürften. Diese zusätzlichen Ewigkeitskosten sind daher dem Braunkohlenbergbau anzurechnen.

Auch Forkel (2011) nimmt Bezug auf den „gesellschaftspolitischen Konsens" und kommt zum Ergebnis: „*Würde man diese Entscheidung heute umkehren wollen und das Grundwasser auf seinen natürlichen Stand ansteigen lassen, stünde die mittlerweile erstellte Bebauung mit ihren Kellern sowie auch diverse infrastrukturelle Einrichtungen (u.a. die Autobahn A61) langfristig mehrere Meter unter Wasser.*"

Bezüglich der geotechnischen Sicherheit von Tagebauen wird beispielsweise im 3. Rahmenbetriebsplan für den Tagebau Hambach (RWE, 2011) lediglich über Berechnungen zur Standsicherheit der Randböschungen und Endböschungssysteme berichtet, ebenso in Hanisch (2013) und Petri und Stein (2012). Forkel (2011) nennt jedoch als Grund für die Entspannung der Liegendgrundwasserleiter auch die Gefahr eines hydraulischen Grundbruchs. Ausführungen zur geotechnischen Sicherheit der Tagebau-Sohlen gegenüber einem hydraulischen Grundbruch während aller zu durchlaufenden Bauzustände im Flutungs-Zeitraum scheinen hingegen systematisch zu fehlen. Dies mag daran liegen, dass sie in der *Richtlinie für die Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen der im Tagebau betriebenen Braunkohlenbergwerke (RfS), zuletzt neu gefasst am 16. Mai 2003* nicht explizit vorgeschrieben sind.

Im Falle eines solchen hydraulischen Grundbruchs auf der Tagebausohle könnten ansonsten standsichere Böschungsabschnitte ihr Widerlager verlieren und abrutschen (ähnlich dem bekannten Schadensfall im Braunkohlentagebau von Nachterstedt in Sachsen-Anhalt).

Bodensenkungen über Kippen

Bei Abraumkippen des Braunkohlenbergbaus wird zwischen Innenkippen, überhöhten Innenkippen und Außenkippen unterschieden: Bei Aufschluss eines neuen Tagebaus muss der Abraum zunächst außerhalb aufgeschüttet werden. Mit fortgeschrittenem Abbau kann der Abraum dann im bereits ausgekohlten Bereich des Tagebaus verkippt werden, auch über die ursprüngliche Geländehöhe hinaus. Insbesondere die Außenkippen bilden mitunter markante Höhen in der ansonsten eher flachen Landschaft. Eine Aufstellung von Außenkippen im Rheinischen Revier mit weiteren Informationen findet sich bei Wikipedia (2014f).

Ausgedehnte Kippenflächen in den ehemaligen Tagebauen Zukunft-West, Ville, Frechen, Bergheim, Fortuna-Garsdorf, sowie Teilen von Garzweiler I sind heute rekultiviert und wieder in landwirtschaftlicher Nutzung (Abbildung 63). Gleiches gilt auch für einige Außenkippen.

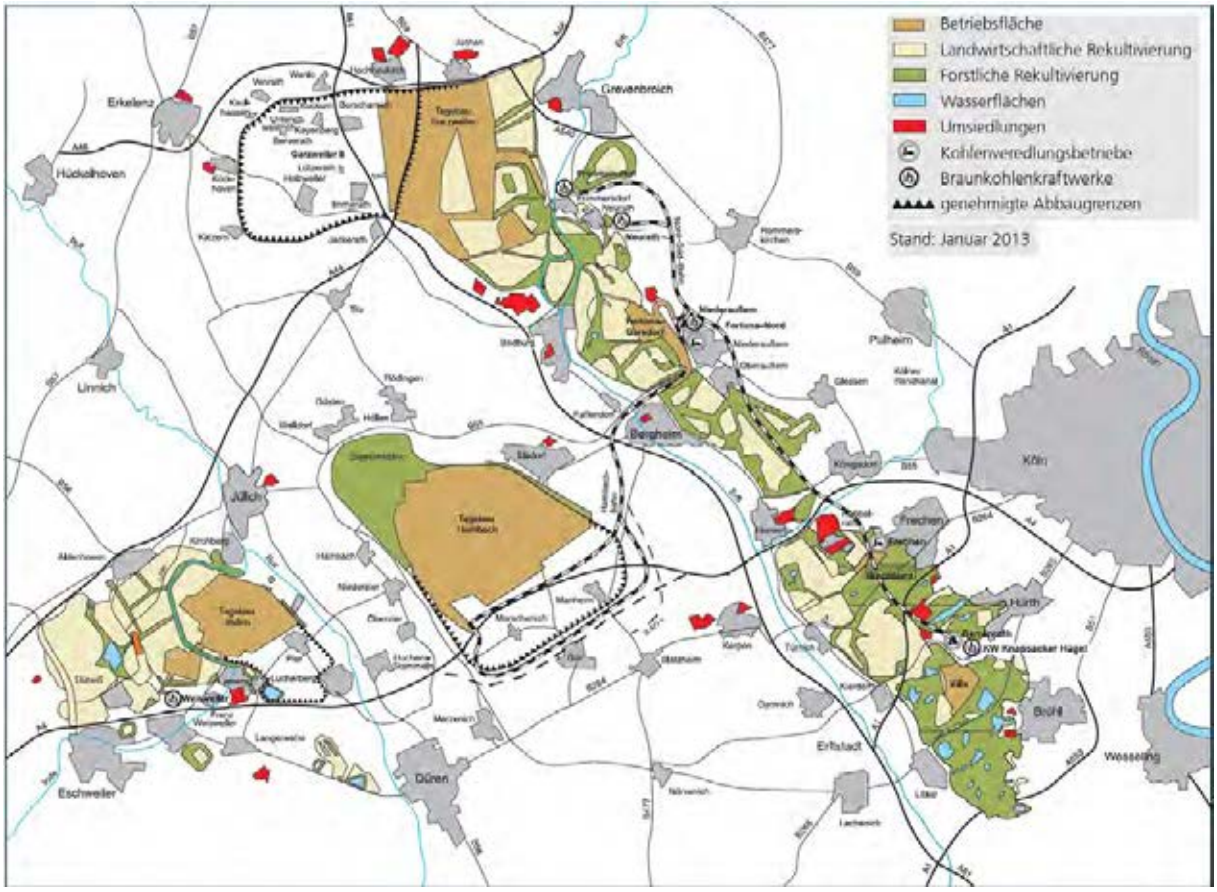


Abbildung 63 – Rheinisches Braunkohlenrevier, mit Rekultivierungsflächen. (Nach DEBRIV, 2015)

Während der Wiederanstieg des Grundwassers in dem bergbaulich unverritzen, aus „gewachsenem Boden“ bestehenden Untergrund zu einer mehr oder weniger signifikanten Umkehr der eingetretenen Bodensenkungen führen kann, verhält es sich bei den Kippenmassiven umgekehrt. Die Lagerungsdichte der trocken (bergfeucht) verstürzten Abraummassen ist geringer als diejenige von gewachsenem Boden, bei dem die Sedimentpartikel unter Wasser dicht an dicht eingeregelt worden sind. Daher neigen Kippenmassive unter dem Einfluss verschiedener Kräfte zur Kompaktion, mit der Folge von Bodensenkungen. Wegen der großen Mächtigkeiten der Kippenmassive in Rheinischen Revier,

die teilweise über 300 Meter betragen, sind auch die zu erwartenden Bodensenkungen erheblich.

Man muss zwischen Setzungen und Sackungen unterscheiden:

Setzungen: Unter dem Eigengewicht einer aufgeschütteten Kippe werden die Porenräume teilweise zusammengedrückt und es kommt zu (Eigen-)Setzungen, die unmittelbar nach Aufschüttung einsetzen und langsam abklingen, jedoch ohne das vollständige Kompaktionspotential (Porenraum) auszuschöpfen. Setzungen können durch Auflasten, beispielsweise von Bauwerken, verstärkt werden (Fremdsetzungen).

Um Missverständnisse zu vermeiden ist es wichtig, einige in der Braunkohleindustrie gebräuchliche Definitionen zu kennen. Kothen und Knufinke (1990) schreiben:

- Als Beginn der Vollsetzungszeit wird der Zeitpunkt der letzten Last-Aufbringung festgelegt.
- Als Ende der Vollsetzungszeit wird der Zeitpunkt angesehen, an dem die Setzungsgeschwindigkeit unter 1 cm/Jahr absinkt.
- Als relative Vollsetzung bezeichnet man den Setzungsbetrag zwischen Beginn und Ende der Vollsetzungszeit in Prozent der Kippenmächtigkeit: Wenn z.B. eine Kippe von 200 m Mächtigkeit sich in der Vollsetzungszeit um 3 m setzt, beträgt die relative Vollsetzung 1,5 %.
- Unter Restsetzung versteht man die Setzung ab einem bestimmten Zeitpunkt bis zum Ende der Vollsetzungszeit.

Für viele praktische Fragestellungen, insbesondere bezüglich des Baugrundes, sind Setzungsgeschwindigkeiten von 1 cm/a aber keinesfalls irrelevant. Kritisch zu sehen ist auch das dadurch implizierte Verständnis von Restsetzungen, die ab Unterschreitung der 1 cm/Jahr-Senkungsrate nicht mehr berücksichtigt werden.

Für Kippen im Lausitzer Braunkohlenrevier wurden Setzungsbeträge von 1,5 % bis 2 % der Kippenmächtigkeit berichtet (Förster, 1994).

Für die Verhältnisse in Rheinischen Revier stellen Kothen und Knufinke (1990) eine Diagrammdarstellung vor, die eine Abschätzung der Eigensetzungen ermöglicht (Abbildung 64). Aus dieser Abbildung 64 ist abzulesen, dass z.B. eine 300 m mächtige Kippe sich nach 5 Jahren um etwa 3,4 m (1,13%), nach 50 Jahren um etwa 4,5 m (1,5 %), nach 100 Jahren um 4,9 m (1,63%) gesetzt hat, wobei die Setzung sich danach weiter fortsetzt und asymptotisch gegen null geht.

Der Einfluss des ansteigenden Grundwassers im Kippenmassiv ist dabei nicht berücksichtigt, auch wenn Kothen und Knufinke (1990) dessen Einfluss durch Hinweise auf Niederschläge und die Wirkungen des Auftriebs (s.u.) bei Grundwasseranstieg zu relativieren versuchen.

Kothen und Knufinke (1990) weisen auch auf das Problem der Muldenbildung auf Kippenflächen hin. Solche Mulden (lokale Senkungsmaxima) entstehen durch Heterogenitäten im Kippenmassiv, die beispielsweise durch die blockweise Verkippung mit unterschiedlich zusammengesetztem Abraummaterial zustande gekommen sind. Auf alten Kippen haben solche Mulden innerhalb von 20 Jahren Tiefen bis 1 Meter erreicht.

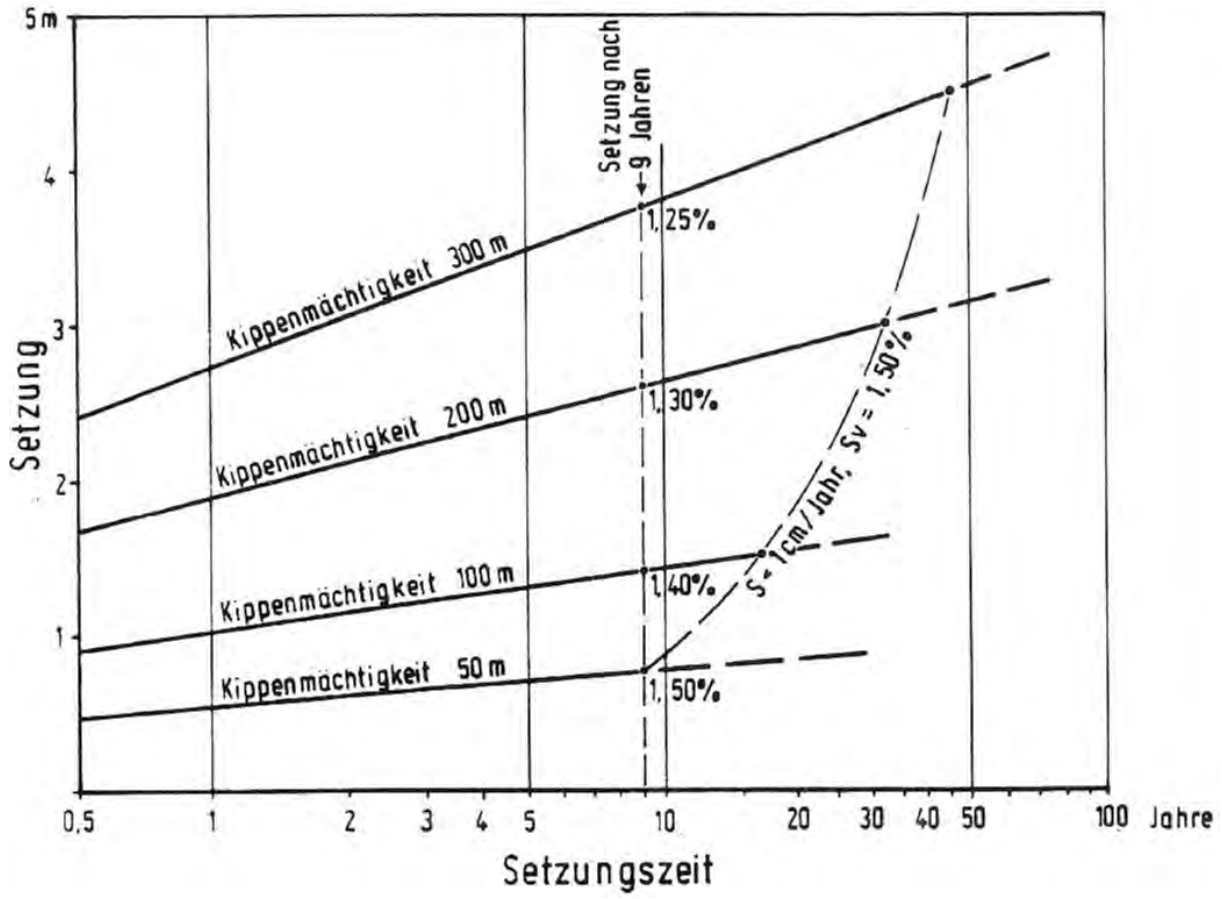


Abbildung 64 – Zusammenhang zwischen Setzungsbetrag, Setzungszeit und Kippenmächtigkeit. (Aus Kothen und Knufinke 1990)

Starke (1990) hält jedoch Bebauungen von Neulandflächen für unproblematisch und schreibt: *„Sowohl für Wohngebiete, gewerbliche Nutzung, Verkehrswege und ähnliches werden Neulandflächen ohne Erschwernisse genutzt, besonders dort, wo bereits diese Nutzung während der Verkippung bekannt war und mit geeignetem Abraummaterial darauf Rücksicht genommen werden konnte.“* Er schränkt jedoch bezüglich des Zeitbedarfs für Restsetzungen weiter ein: *„Der Zeitraum zwischen Herstellung und Bebauung von Neulandflächen hängt sowohl von der Kippentiefe als auch vom Abraummaterial ab. Generell ist nach bisherigen Erfahrungen ein Zeitraum von 10 Jahren das mindeste, 15 Jahre sind zu empfehlen, wogegen man bei Schwerbauten unbedingt einige Jahrzehnte warten sollte.“*

Mit fortschreitender Landinanspruchnahme durch den Tagebau Inden musste bis 2004 der namensgebende Fluss Inde auf einer Länge von ca. 12 Kilometern zumeist über rekultivierte Kippenflächen verlegt werden. Zur Gewährleistung des angestrebten Gefälles von 1:900 mussten die Setzungen des Untergrundes möglichst genau prognostiziert werden (Abbildung 65), um spätere unzulässige Gefälleänderungen zu verhindern. Auch nach den bis 2004 bereits eingetretenen Setzungen wurden für den Ort der größten Kippenmächtigkeit von 156 m immer noch Restsetzungen und Sackungen von 2,2 m (entsprechend 1,41 Prozent) errechnet (Lüttecke und Schwerger 1999). – Es scheint, dass dabei der Einfluss von Sackungen (s.u.) während des später wiederansteigenden Grundwassers nicht explizit berücksichtigt wurde.

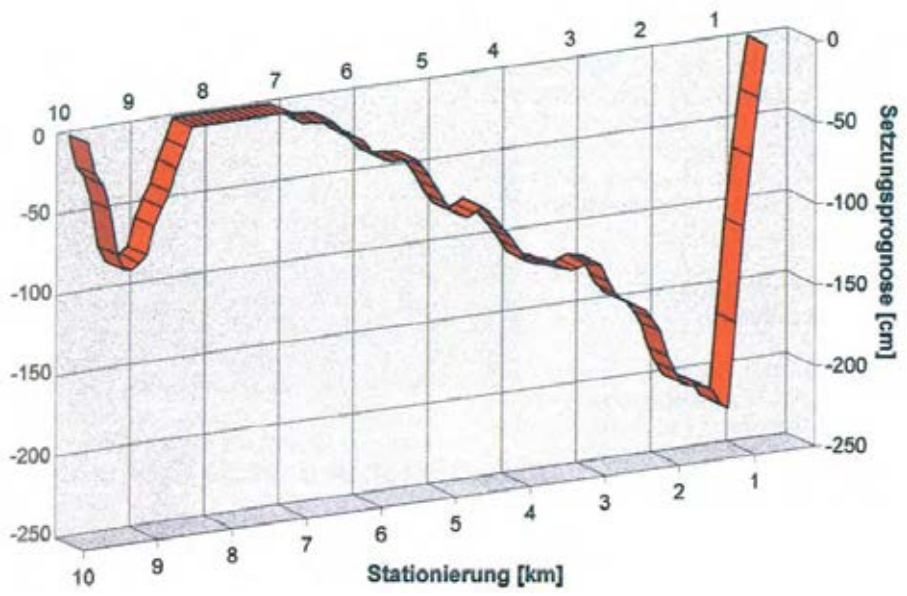


Abbildung 65 – Setzungsprognose entlang des Verlaufs der neuen Inde, ab Herstellung der geotechnischen Basisabdichtung für die Inde-Flur. (Aus Lüttecke und Schwerger 1999)

Sackungen: Bei ansteigendem Grundwasser kommt zur Schwerkraft die Wirkung von Kapillarkräften und Auftriebskräften hinzu. Kapillarkräfte sind bestrebt durch Benetzung und Kontraktion die Oberflächenenergie zu minimieren und führen so zur Auflösung mikroskopischer Aggregatstrukturen, wodurch die Festigkeitsparameter Kohäsion und Innerer Reibungswinkel abgemindert werden. Auftriebskräfte vermindern die schwerkraftbedingte Kornpressung und begünstigen damit Kornumlagerungen im Stützkorngefüge. Beide Prozesse zusammen bewirken Gefügeverdichtungen und als makroskopisches Äquivalent Sackungen der Kippenmassive. Sackungen verlaufen meistens kontinuierlich und parallel zum Grundwasseranstieg, jedoch sind auch spontane Ereignisse bekannt, die eine potentielle Gefahr darstellen können.

Für Kippen in der Lausitz werden Sackungen von 1 % bis 2 %, in Ausnahmefällen bis 4 % der überfluteten Kippenhöhe berichtet (Förster, 1994). Drebenstedt und Rascher (1998) nennen für Kippen in der Lausitz Werte von 2 % bis 2,5 % der Kippenhöhe für die Summe aus Eigensetzungen und Sackungen.

Im Rheinischen Braunkohlenrevier haben die Kippenmassive aufgrund der viel größeren Tiefe der Tagebaue und der teilweise überhöhten Innenkippen (Hambach +200 m NHN) deutlich größere Mächtigkeiten (Inden: 180-200 m; Hambach über 400 m; Garzweiler bis 200 m) als in der Lausitz (um 100 m). Setzt man einen Sackungsanteil von insgesamt 2 % an, so ergeben sich bei 200 m Kippenmächtigkeit Bodensenkungen von 4 Meter, bei 400 m Kippenmächtigkeit von 8 Meter (bei 4% Sackung dann 16m).

Den Risiken durch Setzungen und Sackungen kann man nur dadurch begegnen, dass man die Kippenmassive durch technische Maßnahmen ausreichend verdichtet, entweder während der Herstellung, oder spätestens bevor (ggf. noch während) es zum Grundwasseranstieg kommt.

Kippen werden in mehreren Kippenscheiben aufgeschüttet, wobei eine grobe Sortierung nach Bodentypen vorgenommen wird. Beispielsweise wird versauerungsfähiger (pyritreicher) Abraum zuunterst verkippt, und der fruchtbare Lössboden wird als letzte Kulturschicht aufgetragen. Aufgrund der ansonsten ziemlich chaotischen Schüttung in Kippenmassiven und dem resultierenden inhomogenen Aufbau muss auch mit örtlichen Unterschieden im Setzungs- und Sackungsverhalten und daraus resultierenden Schieflagen gerechnet werden. Abbildung 66 gibt einen Eindruck vom Aufbau einer Kippenscheibe, bei der bewusst schlammiger Abraum in einzelnen Poldern verstürzt worden ist.

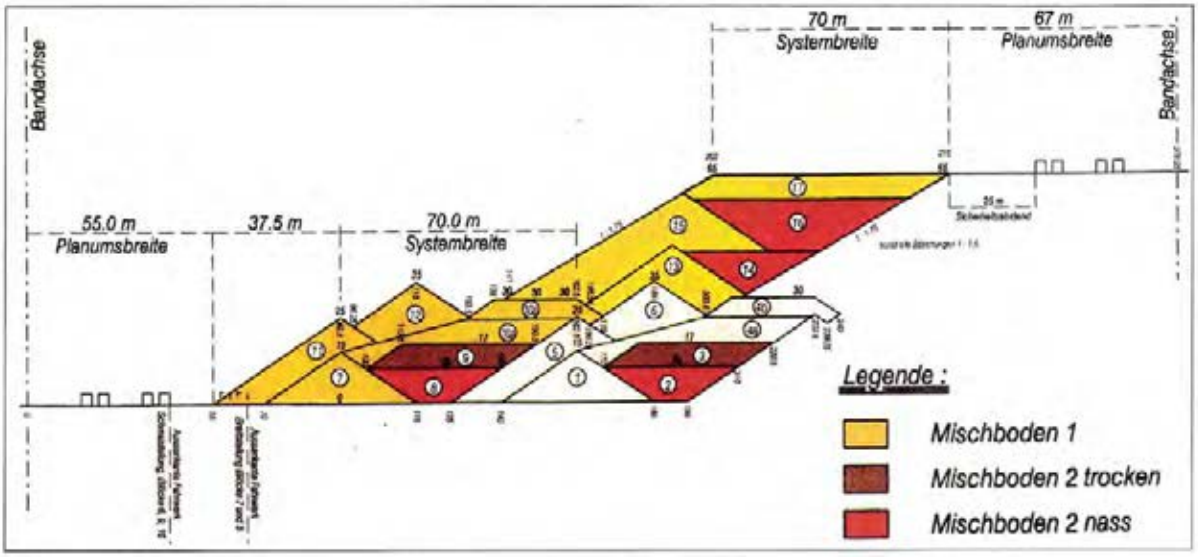


Abbildung 66 – Aufbau einer Kippenscheibe aus unterschiedlichen „Bodentypen“. Mischboden 2 (rot) steht für Abraum mit hohen Ton - und Schluffanteilen. Die eingekreisten Zahlen geben die Herstellungs-Reihenfolge an. Aus Hempel und Kulik (2003)

Insbesondere im Übergangsbereich von Kippenböden zu gewachsenen Böden muss beim Wiederanstieg des Grundwassers mit gegenläufigen Bodenbewegungen und der Ausbildung von Geländestufen gerechnet werden.

Die Kippenflächen und besonders ihre Randbereiche sind daher aus mehreren Gründen als Baugrund schlecht geeignet und stellen sehr hohe Anforderungen an die Gründung von Bauwerken. Schlüter (2002) hat sich in seiner Diplomarbeit mit dieser Problematik auseinander gesetzt und schreibt bezüglich bereits ausgeführter Bauvorhaben:

„Die Gründungen waren teuer und stets mit Risiken für die Gebrauchsfähigkeit des Bauwerkes verbunden.“ (…) *„Wegen der »jungen geologischen Ablagerung«, der »unkontrolliert geschütteten Geländeauffüllung«, der lockeren Lagerung sowie der Inhomogenität der Tagebaukippen, sind bautechnische Maßnahmen auf Kippen, als Baumaßnahmen unter schwierigen Baugrundverhältnissen, gemäß DIN 4020 Abschnitt 6.2.2.4 b) und f), in die geotechnische Kategorie 3 einzugliedern. Diese Maßnahmen müssen durch einen in geotechnischen Fragen sachverständigen Ingenieur beurteilt werden.“*

Bodenverflüssigung: Als Folge des labilen Schüttungszustands können Kippenmassive bei wieder ansteigendem Grundwasser, oder auch noch in der Folgezeit, spontan durch ein zufälliges Initial ausgelöst, ihre Festigkeit verlieren und fließfähig werden. Dieses als Bodenfließen oder Bodenverflüssigung bekannte Phänomen ist besonders in den Braunkohlekippen der Lausitz weit verbreitet und gefürchtet. Es wird durch folgende Faktoren begünstigt (Drebenstedt und Rascher, 1998):

- Kritischer Wasserstand in der Kippe im Verhältnis zur Kippenhöhe (>0,2).
- Kornband 0,09 mm < d50 < 1,0 mm, Feinkornanteil gering.
- Kornform gerundet (typisch für quartäre Sande des Lausitzer Urstromtales).
- Geringe Lagerungsdichte (kritischer Wert wird bei der Verkippung von Sanden kaum überschritten).
- Lasteintrag (Böschungsabbruch, Strömung, Sackung, rasche Belastung)

Bodenverflüssigungen infolge eines ansteigenden Grundwasserstandes können sowohl an Kippenböschungen wie auch in böschungsfernen Kippeninnenflächen auftreten, manchmal erst Jahrzehnte nach der Kippenschüttung (Kuyumcu 2012). An Böschungen sind wegen der fehlenden seitlichen Einspannung Rutschungen die Folge, auf Kippeninnenflächen hingegen Sackungen und Bodeneinbrüche.

Für die geplanten Restseen in den Tagebauen Inden, Hambach und Garzweiler sind Untersuchungen zu den Risiken von Bodenverflüssigung in den umgebenden Kippen dringend geboten. Grundsätzlich sollte auf Kippenflächen und ihren Randbereichen die Errichtung von Bauwerken vermieden werden.

Zwischenfazit Bodensenkungen über Kippen:

Im 3. Rahmenbetriebsplan für den Tagebau Hambach (RWE, 2011) wird folgende Perspektive in Aussicht gestellt:
„Im Zuge der Weiterentwicklung der Innenkippe kann die bereits im 2. Rahmenbetriebsplan begonnene landwirtschaftliche Wiedernutzbarmachung im nordöstlichen Bereich zwischen den Jahren 2020 und 2030 zur Sicherstellung eines im Endzustand ca. 500 m breiten geländegleichen Anschlusses vor Elsdorf fortgeführt werden. Damit rückt der Tagebaubetrieb wahrnehmbar von der Ortslage ab. Zudem wird die Option einer zukünftigen Entwicklung der Stadt Elsdorf eröffnet.“

Derartige Vorstellung, ebenso wie das Fehlen jeglicher Betrachtungen über Kippensetzungen im 3. Rahmenbetriebsplan (RWE, 2011), könnten Indizien dafür sein, dass man sich diesem Problem bislang nicht gestellt hat.

Vor einer Stadtentwicklung mit Bebauung der Kippenflächen und der angrenzenden Randbereiche aus gewachsenen Böden muss wegen zu erwartender Setzungsschäden abgeraten werden.

Für das Rheinische Braunkohlenrevier wurden nur wenige Arbeiten zum Setzungs- und Sackungsverhalten der Kippenmassive gefunden. Insbesondere mit dem Einfluss wiederaufsteigender Grundwasserstände für die häufig bereits wieder landwirtschaftlich genutzten Kippenflächen scheint man sich noch nicht umfänglich auseinandergesetzt zu haben.

Geochemische Aspekte

Pyrit-Oxidation

Braunkohlen und auch die tertiären Abraumschichten weisen Gehalte von Eisensulfiden („Pyrit“) im Promille-Bereich bis zu 1 bis 2 Prozent auf (Lenk und Wisotsky 2008). Es handelt sich dabei überwiegend um das kubische Eisendisulfid Pyrit (FeS_2), untergeordnet auch um den orthorhombischen Markasit (FeS_2) und möglicherweise in Spuren um Greigit (Fe_3S_4) oder Smythit ($(Fe,Ni)_{3+x}S_4$)).

Die wichtigsten pyrithaltigen Sedimente im Rheinischen Braunkohlenrevier sind die Neurather Sande, die im Tagebau als Zwischenmittel (Horizonte 7 und 8) zwischen den Braunkohleflözen verbreitet sind, sowie die feinkörnigen Sedimente der Rotton- und Reuver-Serie (Lenk und Wisotzky 2008).

In den durchlüfteten Kippenmassiven und in den belüfteten Randbereichen der Tagebaue wird Pyrit in feuchtem Zustand und in Gegenwart des Luft-Sauerstoffs oxidiert und bildet dabei (über zahlreiche Reaktionsschritte mit metastabilen Zwischenprodukten) unter anderem Schwefelsäure. Soweit das Kippenmaterial bzw. Nebengebirge keine ausreichende Pufferwirkung aufweist, führt die Pyritoxidation zu sehr sauren, eisen- und sulfatreichen Kippenwässern, die ihrerseits geogen vorhandene Schwermetalle und andere „Schadstoffe“ mobilisieren können. Andererseits wird beispielsweise Phosphor den Gewässern durch Mitfällung in Eisenoxidhydraten dem Wasser entzogen (Landesumweltamt Brandenburg, 1995).

Die Pyritoxidation im Calcit-gepufferten Bereich kann durch folgende Reaktions-Gleichung (Summen-Gleichung) beschrieben werden:

$$FeS_2 + 3{,}75\ O_2 + 3{,}5\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2\ SO_4^{--} + 4\ H^+ \qquad \text{(Reaktion 1)}$$

Die Kinetik der Oxidationsreaktion ist allerdings wesentlich komplizierter. Eine maßgebliche Rolle scheint das Fe^{3+} Ion als autokatalytisch wirksame Lösungs-Spezies zu spielen, welche die Oxidation des Sulfid-Schwefels begünstigt und dabei selbst zu Fe^{2+} reduziert wird, durch Reaktion mit Luftsauerstoff dann aber wieder zu Fe^{3+}oxidiert wird.

Durch Mineralpuffer wie „Kalk“, also in der Regel überwiegend Calcit ($CaCO_3$), können die freigesetzten Wasserstoffionen neutralisiert werden, solange die Pufferkapazität ausreicht:

$$CaCO_3 + H^+ \rightarrow HCO_3^- + Ca^{++} \qquad \text{(Reaktion 2)}$$

Zwar treibt die Entfernung der Wasserstoff-Ionen in Reaktion 2 die Reaktion 1 nach rechts, doch wird infolge der pH-Wert-Pufferung die Konzentration des katalytisch wirkenden Fe^{3+} Ions durch Hydrolyse stark begrenzt. Dadurch wird der Oxidationsprozess in Gegenwart von Calcit verlangsamt.

Die Oxidation des Pyrits hat demnach mehrere Effekte:

- Bildung von Wasserstoffionen, die zur Versauerung des Grundwassers führen können, wenn pufferwirksame Substanzen in ausreichender (äquivalenter) Menge fehlen.
- Umwandlung des in schwerlöslichem Pyrit gebundenen Disulfid-Schwefels in leicht löslichen Sulfatschwefel, mit der Folge steigender Sulfatkonzentrationen im Grundwasser.
- Anstieg der Konzentration von Calcium (Härtegrad) aus der Säurepufferung durch Calcit. Anstieg der Konzentrationen mobilisierter Spurenelemente, insbesondere Schwermetalle, Aluminium und Arsen, die einerseits aus dem zersetzten Pyrit, andererseits aus Nebengesteinsreaktionen stammen können.

Hieraus ergibt sich auch, dass die Pufferung des pH-Wertes zwar die Versauerung, nicht jedoch den Anstieg der Sulfat-Konzentration und bestimmter Spurenelemente im Grundwasser verhindern kann.

Um die Pyrit-Oxidation zu verhindern wäre es notwendig die Oxidationsmittel, also in erster Linie den Luftsauerstoff, anderweitig zu binden bzw. zu entfernen, beispielsweise durch Zugabe einer stark reduzierenden und reaktiven Substanz, wie metallisches Eisen. Eine andere Option wäre die Entfernung der Luft durch Verdrängung mit einem schwereren und nicht oxidierend wirkenden Gases, z.B. Kohlendioxid (CO_2).

Säure-Base-Gleichgewichte und Kalkung

Durch Vergleich der Reaktionen (1) und (2) erkennt man, dass zur Neutralisation der aus 1 Mol Pyrit (122 Gramm) gebildeten Säure theoretisch 4 Mol Calciumcarbonat (400 Gramm) verbraucht werden. Damit dieser Mineralpuffer die Versauerung rein rechnerisch verhindern kann, müsste (gewichtsmäßig) mindestens 3,28 mal mehr Calcit als Pyrit vorhanden sein.

In Kippenwässern in der Lausitz wurden sogar pH-Werte deutlich unter pH 2 gemessen, sodass auch der HSO_4^-/SO_4^{2-} Puffer, der entsprechend der 2. Dissoziation der Schwefelsäure (pK_2 = 1,99) bei pH-Werten um pH 2 puffert, unzureichend ist und das fehlende Puffervermögen der dortigen Kippensubstrate unterstreicht.

Lenk und Wisotzky (2007, 2008) berichten, dass im Tagebau Garzweiler seit 1998 dem Abraum Kalk zu dosiert wird um die Säurebildung zu minimieren. Im Tagebau Inden seien die natürlich vorhandenen Kalkgehalte ausreichend um die entstehende Säure weitestgehend zu neutralisieren.

Die zugegebenen Kalkmengen (Abbildung 67) sind allerdings nicht auf den gesamten Pyritgehalt berechnet, sondern nur auf den bereits oxidierten Anteil, der analytisch ermittelt wird.

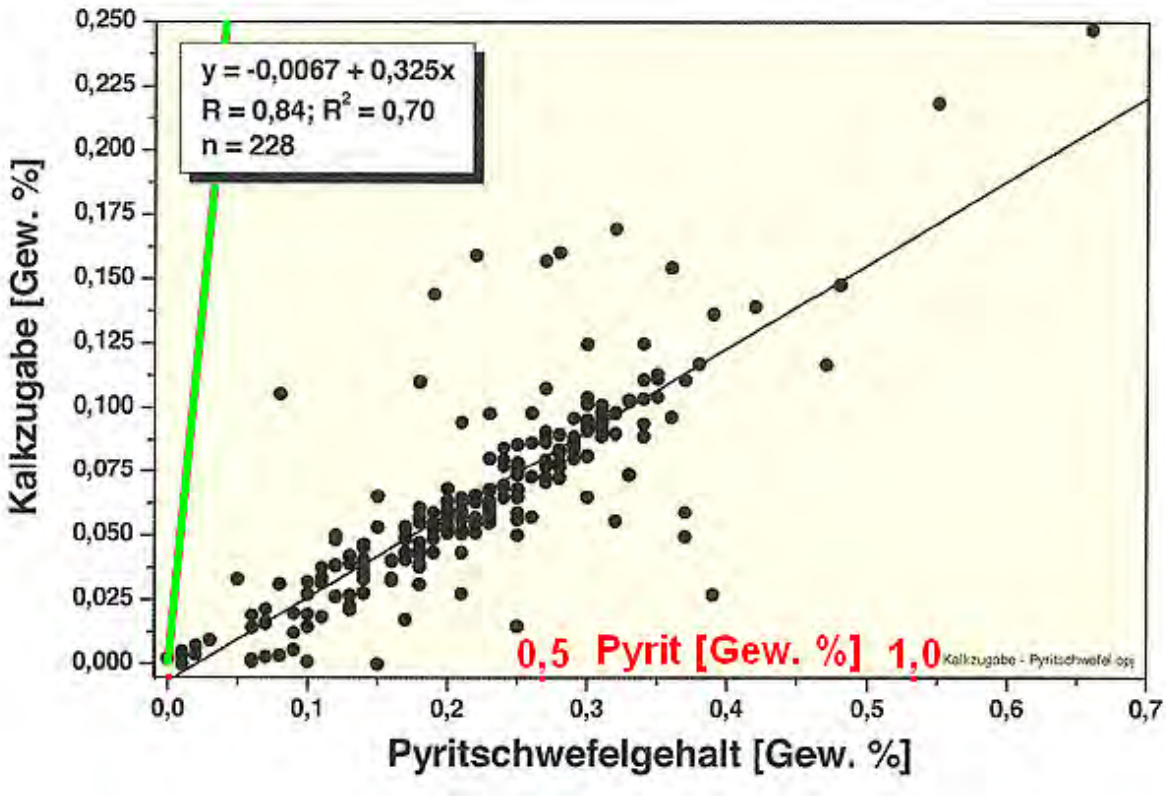


Abbildung 67 – Technische Kalkzugaben in Abhängigkeit vom Pyritschwefelgehalt (bzw. Pyrit-Gehalt: rot) des Abraums (Datenpunkte und schwarze Linie). Grüne Linie: stöchiometrisch erforderliche Kalkmenge. Aus Lenk und Wisotsky (2008), ergänzt vom Verfasser.

Außer den Kippenmassiven müssen auch die ausgedehnten Belüftungszonen im gesümpften Nebengebirge der Tagebaue berücksichtigt werden, die allenfalls eine geringe Pufferkapazität durch natürliche Karbonatgehalte aufweisen.

Aufgrund der nicht-stöchiometrischen Pyrit:Calcit-Verhältnisse der Kippensubstrate und der ohnehin nicht ausreichend gepufferten belüfteten Nebengebirgsbereiche muss davon ausgegangen werden, dass nach anfänglicher Pufferwirkung eine Versauerung eintreten kann, sobald der pufferwirksame Calcit und ggf. weitere Mineralpuffer verbraucht sind. Soweit derzeit in Kippenwässern (noch) mehr oder weniger neutrale pH-Werte gemessen werden, liegt dies möglicherweise nur daran, dass das Pyrit-Reservoir noch nicht vollständig oxidiert und die Pufferkapazität des Kippensubstrats noch nicht völlig erschöpft worden sind.

Wasserqualität

Abbildung 68 zeigt beispielhaft den Verlust eines Trinkwasserbrunnens im Wasserwerk Aldenhoven durch eindringendes Kippenwasser. Der Brunnen liegt etwa 500 m nordwestlich vom Tagebaurand Inden I und im Abstrombereich der Innenkippen von Tagebau Zukunft-West und Inden I. Nach der Einschätzung von Lenk und Wisotzky (2008) soll der dort verkippte Abraum aus Substraten mit ausreichender natürlicher Pufferung bestehen. Über die

Entwicklung der pH-Werte im dargestellten Brunnen (Abbildung 68) liegen keine Informationen vor.

Offensichtlich kann die Pufferung des pH-Wertes nicht die Bildung sulfatischer Kippenwässer verhindern, deren Konzentrationen weit über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung für Sulfat-Ionen (250 mg/L SO4) liegen. Das Durchbrechen der Kippenwässer in den Brunnen wird durch die sprunghaft angestiegenen Sulfat-Konzentrationen belegt. Der gleichzeitige Anstieg der Calcium-Konzentrationen ist durch die Auflösung von Calcit im Zuge der Puffer-Reaktion (s.o., Reaktion 2) zu erklären.

Ein weiteres Beispiel für die Ausbreitung von Kippenwässern im östlichen Abstrombereich der Sophienhöhe (Außenkippe des Tagebaus Hambach) ist in Abbildung 69 dargestellt. Auch in diesem Beispiel zeigt die starke Zunahme der Sulfat-Konzentrationen den Durchbruch von Kippenwässern an. Auch hier kann die Pufferung des pH-Wertes allein offensichtlich nicht die Bildung sulfatreicher Kippenwässer verhindern. Die Nitratgehalte an dieser Messstelle zeigen eine gegenläufige Entwicklung zu den Sulfat-Konzentrationen. Diese Beobachtung lässt sich durch eine Redox-Reaktion zwischen Nitrat und zweiwertigem Eisen aus der Pyritauflösung erklären, entsprechend nachfolgender Reaktionsgleichung (Reaktion 3):

$$10\ Fe^{2+} + 2\ NO_3^- + 6\ H_2O \rightarrow 10\ Fe^{3+} + N_2 + 12\ OH^- \qquad \text{(Reaktion 3)}$$

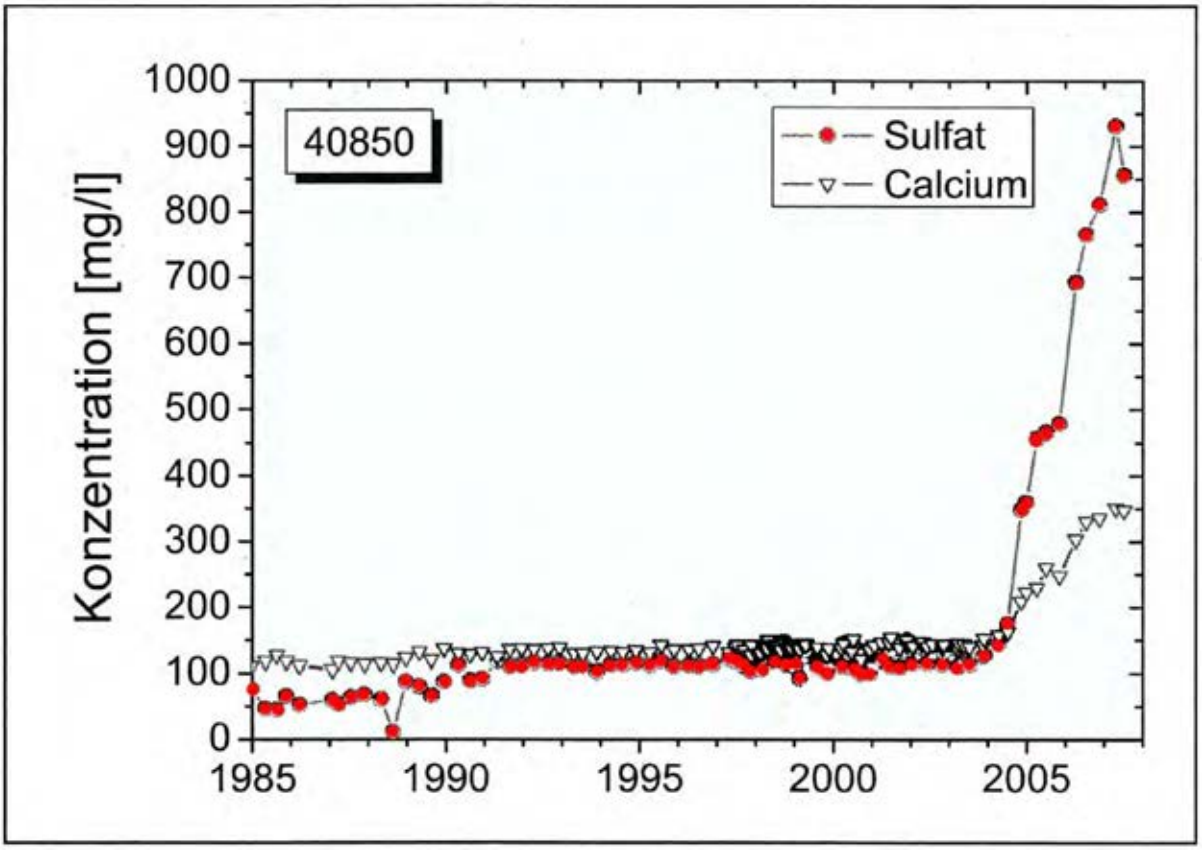


Abbildung 68 - Entwicklung der Sulfat- und Calcium-Konzentrationen in einem Förderbrunnen des Wasserwerks Aldenhoven (Messstelle 40850). (Nach Cremer, 2007)

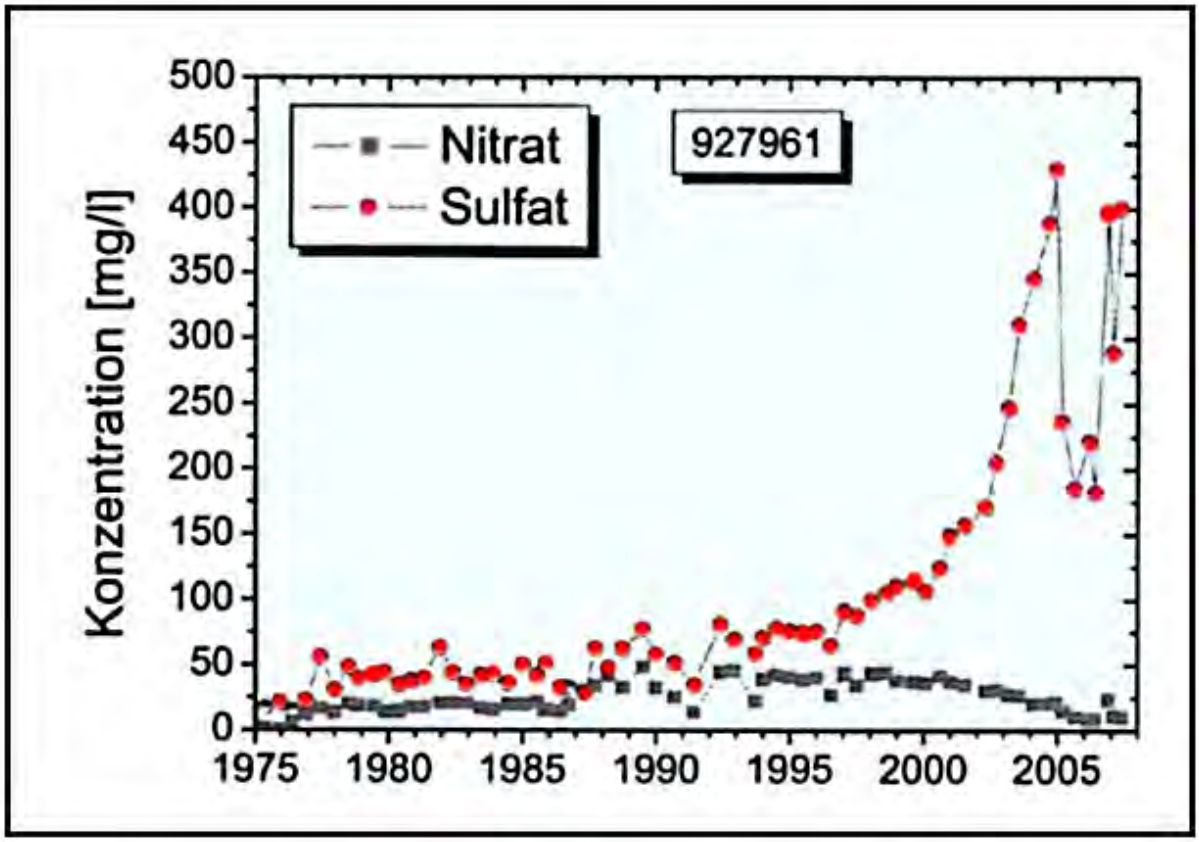


Abbildung 69 - Entwicklung der Sulfat- und Nitrat-Konzentrationen in einer Messstelle östlich der Sophienhöhe (Messstelle 927961). (Nach Cremer, 2007)

Eine Folge der Bildung saurer Kippenwässer ist die Mobilisation von Schwermetallen, Arsen und auch Aluminium-Ionen, die durch Mineralreaktionen, Ionenaustauch und Desorptions-Reaktionen in Lösung gehen können.

Besonders beim Wiederanstieg des Grundwassers kommt es somit zur Bildung mehr oder weniger saurer, Sulfat-reicher, Eisen-, Aluminium- und Schwermetall-haltiger (Kippen-) Grundwässer. In Bereichen mit geringem Flurabstand stehen diese Kippenwässer dann bereits in geringer Tiefe an und können lokal vielleicht sogar die Oberfläche erreichen. Durch Kapillarsaufstieg und Verdunstung können sich an der Oberfläche schwerlösliche Salze, hier besonders Sulfate (Gips), sowie Eisenoxidhydrate anreichern. Das unter den sauren Milieubedingungen mobilisierte Aluminium könnte unter Umständen pflanzentoxische oder zumindest pflanzenschädliche Konzentrationen erreichen. Durch Mitfällung an Eisenoxidhydraten wird dem Wasser der natürliche Phosphatgehalt weitgehend entzogen.

Sobald sich Kippenwässer mit sauerstoffreichen und neutralen bis schwach alkalischen Oberflächenwässern mischen und nach und nach eine Verdünnung und Neutralisation der Säure eintritt, kommt es zu Ausfällungen der in diesem pH-Bereich schwer löslichen „Ocker“. Ocker sind Eisen(III)oxidhydrate wie Ferrihydrit ($Fe_{10}O_{14}(OH)_2$) oder Goethit (FeOOH) und deren Vorläufer-Phasen. In der Lausitz sind solche Eisenverbindungen in manchen Tagebau-

Restseen als amorphe rotbraune Fällungen deutlich sichtbar. Sie belasten dort seit geraumer Zeit auch das Fluss-System der Spree.

Angesichts der unzureichenden Kalkung der Kippen und dem nicht ausreichenden natürlichen Puffervermögen von belüfteten Aquifer-Gesteinen ist somit Skepsis bezüglich einer mittel- und langfristig günstigen Entwicklung angebracht. Es sollten nicht von den heutigen, möglicherweise (noch) günstigen Verhältnissen falsche Schlüsse auf zukünftige Entwicklungen der Kippenwässer und ganz allgemein der „Ersatz-Grundwässer" gezogen werden, denn die Bildung der Kippenwässer wird erst beim Wiederanstieg des Grundwassers in vollem Umfang einsetzen und den schlechten Zustand des Grundwassers auf Jahrhunderte bis Jahrtausende prägen.

Zwischenfazit Geochemische Aspekte

Die Orte der Pyrit-Oxidation mit Auswirkungen auf die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit sind nicht auf die Kippenmassive beschränkt, sondern umfassen auch die belüfteten Bereiche der Grundwasserleiter im Nebengebirge der Tagebaue.

Die zugegebenen Kalkmengen in den Kippensubstraten reichen nicht aus um die Säurebildungskapazität des gesamten enthaltenen Pyrits zu kompensieren. Die Pyritgehalte im unverritzten aber belüfteten Nebengebirge können durch Kalkzugaben ohnehin nicht gepuffert werden. Daher muss mittelfristig mit der Bildung saurer Kippen- und Grundwässer gerechnet werden.

Durch Kalkung kann bestenfalls die Entstehung von Grundwässern mit sehr sauren pH-Werten verhindert werden. Die davon unabhängige Bildung von Sulfat wird jedoch nicht verhindert. Die Sulfatkonzentrationen werden vielerorts Werte oberhalb des Sulfat-Grenzwertes der Trinkwasserverordnung erreichen. In einigen Brunnen ist dies bereits zu beobachten.

Recherchen zum Datenbestand

Die in diesem Gutachten adressierten Fragestellungen, insbesondere die regionale Reichweite und das Ausmaß der bleibenden Bodensenkungen und der sich einstellenden neuen Grundwasser-Flurabstände in der Nachbergbau-Ära, würden für eine flächendeckende und hochaufgelöste kartographische Darstellung folgende Datengrundlagen erfordern:

Digitale Geländemodelle für die Vorbergbau-Zeit und die Nachbergbau-Zeit

Öffentlich verfügbare digitale Geländemodelle, z.B. DGM10 oder DGM25. Diese werden von der Bezirksregierung Köln vertrieben:
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/gelaendemodelle/index.html

Die Geländemodelle sind georeferenziert, nach den Standards ETRS89/UTM32 und DHHN92. Das Produkt DGM10 beispielsweise ist charakterisiert durch ein 10m-Gitterraster, mit jeweils einem gemittelten „nominalen“ Höhenpunkt. Es wird in „Kacheln“ mit 2x2 km Seitenlänge vertrieben (40.000 Höhenpunkte pro Kachel, 1,1 MByte Dateigröße je Kachel). Die Daten werden als ASCII-Dateien zur Verfügung gestellt.

Bei der Größe des Arbeitsgebietes von ca. 38 Messtischblättern, entsprechend ca. 4.800 km², würden ca. 1.300 Kacheln benötigt. Die Gebühren liegen normalerweise bei 10,00 €/km², in Summe demnach 48.750 €.

Leitnivellements seit Beginn des modernen Braunkohlenbergbaus.

Nivellement-Daten gleicher Festnetzpunkte, aber aus unterschiedlichen Messkampagnen, könnten verwendet werden um durch Differenzbildung für jeden Festnetzpunkt die zeitlichen Veränderungen der Höhenlage zu errechnen, also ein Weg-Zeit-Profil (Geschwindigkeits-Profil) für jeden Festnetzpunkt. Diese Senkungsgeschwindigkeiten könnten mit Hilfe einer Gridding-Software für jeden Rasterpunkt des Digitalen Geländemodels interpoliert und zugeordnet werden. So könnte aus einer Bezugsfläche (jüngstes verfügbares digitales Geländemodel) und den Geschwindigkeitsdaten für jeden beliebigen, durch Daten abgedeckten Zeitpunkt ein neues digitales Geländemodel errechnet, ggf. auch für die kommenden Jahre prognostiziert werden. So könnte ein Stapel von digitalen Geländemodellen für unterschiedliche Zeitpunkte generiert werden.

Liniengebundene Nivellement-Daten liegen für Hauptnivellements, die das bergbaulich beeinflusste Gebiet abdecken, sowohl bei RWE (Rheinbraun-Nivellement) als auch bei der Bezirksregierung Köln öffentlich verfügbar vor:
http://tim-online.nrw.de

Diese online Datenbasis scheint auch alle Nivellement-Daten von RWE in einer qualitätsgesicherten und kompatiblen Form einzuschließen. Sie ermöglicht allerdings nur

Datenabfragen zu einzelnen Festpunkten, die für die Aufgabenstellung einer flächendeckenden Analyse nicht in Betracht kommt.

Für Einzelabfragen fallen normalerweise Gebühren von 0,90 € je Höhenfestpunkt an. Bei einer benötigten Datenmenge von einigen hunderttausend Datensätzen müsste dann auch mit einem sechsstelligen Euro-Betrag gerechnet werden.

Höhenangaben in Gestalt sogenannter Höhenpunkte an vielen Wegkreuzungen oder anderen markanten Geländepunkten können grundsätzlich auch aus topographischen Karten entnommen werden, wie sie als Grundlage in digitalen Kartendiensten wie z.B. ELWAS Verwendung finden. Eine Anfrage bei der Bezirksregierung Köln (Dezernat 74 – Geschäftsstelle GDI NRW) bezüglich der Aktualität solcher Höhenpunkte, insbesondere in Senkungsgebieten, wurde wie folgt beantwortet:

„In der von Ihnen genutzten Anwendung ELWAS-Web des NRW-Umweltministeriums bezieht sich der in der Fußnote eingeblendete Stand und die Versionsangabe nicht auf die Aktualität der Karten oder der Höhenpunkte, sondern auf die Version und den Stand der Software. Die angezeigten Hintergrundkarten (von der Digitalen Topographischen Karte 1: 100.000 bis hin zur Deutschen Grundkarte 1: 5.000) sind je nach gewählter Zoomstufe unterschiedlich und weisen auch eine unterschiedliche Aktualität auf. Diese Aktualitätsdaten sind über ELWAS-Web nicht abfragbar, sondern lediglich das Bildflugdatum der Luftbilder.

Daneben kann die Aktualität der Höhenangaben in den Karten von der Aktualität des Kartengrundrisses abweichen, da die Fortführungen für Höhen- und Lageangaben getrennt voneinander durchgeführt werden.“

Auf der oben genannten Homepage (tim.online) können auch historische Karten („Neuaufnahme 1891-1912“) zugeladen werden, die im Zusammenhang mit den historischen Ortslagen und Ausdehnungen von Interesse sind.

Hydrologische Daten

Hydrologische Daten werden vom Erft-Verband gesammelt und ausgewertet.
RWE nennt auf seiner WebSite
(http://www.rwe.com/web/cms/de/2374336/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/karten-und-fachinformationen/)
folgende Informationsquellen:

- Ausgangsgrundwasserstände 1953/55 (Erftverband / Landesgrundwasserdienst)
- Grundwasserdifferenzenkarten (Erftverband)
- Pegelmessstellen/Ganglinien (Erftverband, LANUV)

Vorbergbauliche Ausgangsgrundwasserstände sind in Form eines gedruckten aber vergriffenen Kartenwerkes (1: 50.000) aus dem Jahr 1955 in Form von Flurabstandskarten öffentlich verfügbar. Die bei RWE Power und Erft-Verband vorhandenen digitalisierten Äquivalente sind nicht öffentlich zugänglich.

Auf der Website ELWAS
http://www.elwasweb.nrw.de
wird online und öffentlich zugänglich ein Kartendienst angeboten, der Auskunft über die Lage und Bezeichnung von Grundwassermessstellen gibt. Ein Zugriff auf die verknüpften Datenbank-Informationen (Hygris-C) ist lediglich für einen sehr kleinen Anteil (<1 Prozent) dieser Messstellen (mühsam und umständlich) möglich. In diesen seltenen Fällen können weitere Informationen, teilweise sogar Ganglinien des Grundwasserstandes in Diagrammform, abgefragt werden. Für den Löwenanteil der Messstellen sind nützliche Informationen jedoch öffentlich nicht zugänglich.

Der Erft-Verband publiziert im Rahmen seiner Jahresberichte revierweite Übersichtskarten für die aus Messungen konstruierten Grundwassergleichen des oberen Stockwerks und wichtiger tieferer Stockwerke, sowie Grundwasserdifferenzen-Pläne für das obere Stockwerk (Oktober 1955 – Oktober Berichtsjahr). Das Darstellungsformat ändert sich häufig und die Auflösung der Karten (gedruckte A4-Broschüren, PDF-Dateien) ist für praktische Zwecke unzureichend. Die Karteninformationen können in höheren Auflösungen gegen eine Gebühr von der Geschäftsstelle des Erft-Verbandes bezogen werden.

Die Bezirksregierung Köln bietet unter der Web-Adresse
http://www.gis6.nrw.de/ASWebUSG_300/ASC_Frame/portal.jsp
einen Online-Kartendienst zu Überschwemmungsgebieten an. In diesem Dienst werden Überschwemmungsgebiete für ein Jahrhundert-Hochwasser, unter anderem für die Erft, kartographisch dargestellt, bis herab zum Maßstab 1:1000. Im Kontext dieser Studie sind neben Darstellungen der aktuell betroffenen Gebiete auch solche der Überschwemmungsgebiete zur Zeit der preußischen Landaufnahme (1875 bis 1921) von Interesse.

An anderer Stelle bietet die Bezirksregierung Köln unter der Web-Adresse
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/leistungen/abteilung05/54/hochwasserschutz/ueberschwemmungsgebiete/erft/erft/index.html
Detailkarten (1:5000) im PDF-Format zum Download an. Neben den aktuell überschwemmungsgefährdeten Gebieten werden auch Prognosen zusätzlicher Überschwemmungsräume für die Zeit nach dem Wiederanstieg des Grundwassers (also in der Nachbergbau-Ära) ausgewiesen. Bei diesen Prognosen müssten also Senkungsprognosen für das Gelände mit eingeflossen sein, doch hierzu konnten keine Aussagen recherchiert werden.

Numerische Grundwassermodelle und Prognosen

Digitale Modelle für die Grundwasserstände, insbesondere des oberen Grundwasserleiters für die Vorbergbau-Zeit, für die Zeit maximaler Absenkung des Grundwasserspiegels und für die Nachbergbau-Zeit werden von RWE Power betrieben. Aufbau, Kalibrierung, Weiterentwicklung und Dokumentation dieses „Reviermodells“ obliegen der RWE Power AG (Auskunft Erft-Verband). Hierzu gehören insbesondere auch berechnete Flurabstände für den stationären Endzustand (unter Berücksichtigung von Bodenbewegungen). Der Erft-Verband betreibt neben kleinräumigen numerischen Grundwassermodellen auch das „Nordraummodell“ sowie das „Reviermodell“ der RWE Power AG für bestimmte

Fragestellungen. Auch das LANUV betreibt zusammen mit IWW RWTH Aachen ein eigenes numerisches „Großraummodell“.

Alle diese Modelle sind jedoch nicht öffentlich zugänglich. Einen Überblick über die im Rheinischen Revier betriebenen Grundwassermodelle mit den jeweiligen Fragestellungen gibt Simon (2012).

Geologische Bohrprofile

Geologische Bohrprofile werden beim Geologischen Dienst NRW archiviert und können im Einzelfall auf Antrag eingesehen werden, dürfen jedoch nicht kopiert werden.

Umfangreiche Bohrprofildaten liegen auch bei RWE Power vor, sind aber in der Regel nur hinsichtlich betrieblicher Interessen ausgewertet worden. Insbesondere gibt es keine systematische Erfassung oder Korrelation von geringmächtigen Braunkohlen- und Torf-Horizonten im Hangenden der wirtschaftlich interessierenden Flöze.

Bodenkundliche Kartenwerke

Bodenkundliche Kartenwerke sind in Zusammenhang mit den Fragestellungen dieser Studie besonders hinsichtlich von Torfvorkommen und stark torfhaltigen Böden von Interesse. Neben den konventionellen gedruckten Kartenwerken, die beim Geologischen Dienst NRW käuflich zu erwerben sind, sind über das „Geoportal NRW“ bodenkundliche Informationen auf Grundlage der Bodenkundlichen Karte 1:50.000 (BK50) auch öffentlich und on-line verfügbar, unter folgender URL:
https://www.geoportal.nrw.de/application-geoviewer/start/index.php

Sie können zusammen mit anderen Informationsangeboten, z.B. topographischen Grundkarten, in einen sogenannten Viewer geladen werden und auch als Bilddateien (*.jpg) ausgedruckt oder per E-Mail verschickt werden. Leider sind die angebotenen topographischen Grundkarten zumeist sehr veraltet.

Bezüglich der hier besonders interessierenden Moorböden und sonstigen Böden mit signifikanten Torf-Anteilen können sowohl die Themenkarten „BK50 Schutzwürdige Böden“ als auch „BK50 Bodenkarte“ von Nutzen sein. Leider ist die Legende zur Bodenkarte völlig unbrauchbar, weil sie eine übermäßige Vielzahl nicht unterscheidbarer Farbcodierungen verwendet und diese nur mit kryptischen Symbolen erklärt werden, zu denen offenbar ein Symbolschlüssel gehört, der aber fehlt.

Bergschäden

Bei der Bezirksregierung Köln wurde, nach Jahrzehnten intensiver Tagebau-Operationen im Braunkohlenrevier, unter der Web-Adresse

http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/bergschaden/

eine „Anrufungsstelle Bergschäden“ eingerichtet, an die sich Bürger wenden können, wenn Sie einen Bergschaden an ihrem Eigentum vermuten.

Die Geschäftsstelle stellt Formulare bereit und nimmt Anträge von Bergschadensbetroffenen entgegen und übernimmt alle organisatorischen Aufgaben in Zusammenhang mit dem Anrufungsverfahren. Darüber hinaus werden sogenannte „Fachinformationen“ angeboten, bei denen es sich bislang aber noch um eine unsystematische Sammlung von nicht weiter kommentierten Präsentationsfolien und Vorträgen handelt.

Was bislang fehlt sind ein Kataster über gemeldete und regulierte Bergschäden und eine damit verknüpfte kartographische Darstellung beobachteter Bergschäden.

Zwischenfazit zum recherchierten Datenbestand

Bei diversen Landesbehörden und der Industrie sind sehr umfangreiche Datenbestände zur Geodäsie, Hydrologie und Hydrogeologie in digitaler Form vorhanden, jedoch überwiegend für die Öffentlichkeit unzugänglich, kostenpflichtig und/oder nur mühsam zu beschaffen. Integrierte Studien, die das brach liegende Potential der Daten nutzen könnten, scheitern derzeit an Eigentumsrechten, Zugangsrechten, sowie an den Kosten und der dezentralen und nicht harmonisierten Datenspeicherung. Die Einrichtung öffentlich nutzbarer digitaler Kartenserver ist aber ein lobenswerter Anfang.

Bezüglich der Überwachung der Umweltmedien wird die Öffentlichkeit mit wenigen und wenig aussagekräftigen Berichten (Tätigkeitsberichte verbunden mit Selbstdarstellungen) als Informationsquellen abgespeist, die nur beispielhafte und vorinterpretierte und nicht überprüfbare Ergebnisse präsentieren. Die eigentlich interessanten Datenbestände bleiben hingegen weitgehend unzugänglich. Einige Behörden vermitteln im Internet auch eher den Eindruck von Online-Kaufhäusern, in denen interessierten Bürgern für Geld und mit bürokratischem Aufwand Informationen zum Kauf angeboten werden, für deren Beschaffung sie als Steuerzahler schon einmal bezahlt haben.

Hier besteht ein großes Defizit und entsprechender Handlungsbedarf, damit die aus Steuergeldern finanzierten Datenbestände samt Dokumentationen den Bürgern zentral, auf einfachem Wege, in allgemein nutzbaren Formaten, kostenlos, ohne bürokratische Hürden, anonym und online zur Verfügung stehen.

Geologische, hydrologische, ökologische etc. Informationen, die aufgrund gesetzlicher oder behördlicher Auflagen zum Beispiel im Rahmen von Genehmigungsanträgen, Überwachungsprogrammen etc. erstellt werden, sollten ebenfalls zeitnah und entsprechend den oben genannten Kriterien dauerhaft online veröffentlicht werden. Bergbauunternehmen bekommen Rechte zur Ausbeutung von „volkseigenen“ Rohstoffen verliehen, sodass sie auch mit entsprechenden Pflichten zur öffentlichen Dokumentation relevanter Messwerte, Auswertungen, Berichte etc. beauflagt werden sollten, z.B. durch geeignete Nebenbestimmungen in Genehmigungen.

Beantwortung der Fragen

- **Leitfrage1: Welche Absenkungen des Bodens hat es im Bereich des gesümpften Gebietes um die Tagebaue im Rheinischen Braunkohlerevier gegeben?**

Bereits durch die früheren Tagebaue im Bereich der Ville wurde das Grundwasser stark abgesenkt, insbesondere durch die Tagebaue Bergheim und Fortuna-Garsdorf. Letzterer galt damals mit 360 m Tiefe als tiefster Tagebau der Welt. Diese früheren Grundwasserabsenkungen fanden in einem schmalen Streifen nordöstlich des Erft-Sprungs bzw. Horremer Sprungs statt, also im Randbereich der Kölner Scholle zur Erft-Scholle. Mit dem Beginn der Sümpfung für den Tagebau Hambach Mitte der 1970er Jahre hat sich das Absenkungszentrum des Grundwassers sehr allmählich weiter nach Südwesten in die Erft-Scholle verlagert, in den Bereich des Ostrandes des Tagebaus Hambach. Von dort aus wandert das Zentrum des Absenkungstrichters nun weiter nach Südosten und wird ca. 2030 die östlichste Ecke des Tagebaus Hambach erreichen, etwa bei Heppendorf.

Im Bereich zwischen den Tagebauen Bergheim, Fortuna-Garsdorf und Hambach finden sich daher auch die höchsten bisher gemessenen Bodensenkungen von 4,6 Meter (Stand 2013), die mit fortschreitender Sümpfung des Tagebaus Hambach bis ca. 2030/2045 weiter zunehmen werden, mit erwarteten Gesamtsenkungen im Zentrum bis ca. 7 m gegenüber der vorbergbaulichen Situation im Jahr 1955. Die von starken Bodensenkungen größer 1 Meter betroffene Fläche reicht mit Stand 2013 von Bedburg im Nordwesten bis Erftstadt im Südosten und entspricht in ihrer Breite im Wesentlichen der Erft-Scholle. Durch die weiter fortschreitende Sümpfung wird in der Fläche nach NW und SE (Längsrichtung der Erft-Scholle) eine weitere Ausweitung der Bodensenkungen erwartet, während in der Breite die tektonischen Randstörungen der Erft-Scholle (Erft-Sprung etc., Rurrand-Verwerfung) eine hydraulisch bedingte Begrenzung auch für die substantiellen Bodensenkungen bilden.

Auf Grundlage empirischer Beobachtungsdaten ist mit sümpfungsbedingten Bodensenkungen in der Größenordnung von ca. 1,5 Prozent der Grundwasserabsenkung zu rechnen.

Auf dieser Grundlage kann für einen bestimmten Ort eine Prognose der maximalen Bodensenkungen in zwei Schritten vorgenommen werden:

1. Extrapolation der Grundwasserabsenkung des Liegendgrundwasserleiters auf den künftigen Maximalwert (Sümpfungsziel).
2. Schätzung der Bodensenkung aus der Grundwasserabsenkung anhand eines empirischen Faktors.

Beispiel:
Für den Absenkungstrichter des Tagebaus Hambach wird die Grundwasserabsenkung im Liegendgrundwasserleiter (Horizont 5) von 363 m (2013) auf ca. 435 m (2030) weiter fortschreiten. An einem interessierenden Ort im Absenkungstrichter wird demnach im gleichen Zeitraum der Grundwasserspiegel proportional um den Wert (435/363) weiter sinken. Somit kann man für diesen anderen Ort die maximale Grundwasserabsenkung 2030 wie folgt schätzen:

- Schritt 1: Grundwasserabsenkung (2030) = (435/363) · Grundwasserabsenkung (2013)

Im zweiten Schritt errechnet man aus der maximalen Grundwasserabsenkung die Bodenabsenkung durch Multiplikation mit dem empirischen Faktor 0,015 (entsprechend 1,5 %):

- Schritt 2: Bodensenkung (2030) = 0,015 · Grundwasserabsenkung (2030)

Die Bodensenkungen sind nur zu einem kleinen Anteil von etwa 10 bis 15 Prozent reversibel, so dass die betroffenen Gebiete auf Dauer abgesenkt bleiben werden.

Die stärksten Bodensenkungen werden im Raum der Erft-Auen zwischen Bedburg und Erftstadt auftreten, sodass dort in den am stärksten abgesenkten Bereichen auch mit der Notwendigkeit von dauerhaften Wasserhaltungsmaßnahmen gerechnet werden muss. Das Maximum der Bodensenkung wird Werte um 7 Meter erreichen und westlich Heppendorf liegen.

- **Leitfrage 2: Welche Auswirkungen wird das ansteigende Grundwasser im Rheinischen Braunkohlerevier haben?**

Der als „Wiederanstieg des Grundwassers“ bezeichnete Vorgang ist eigentlich eher die Auffüllung der entleerten Grundwasserleiter mit Flusswasser aus Rhein und Rur. Ein Wiederanstieg durch natürliche Grundwasserneubildung würde viele Jahrhunderte in Anspruch nehmen. Der durch aktive Flutungsmaßnahmen in der Nachbergbau-Ära beschleunigte Wiederanstieg des Grundwassers wird eine ganze Reihe von Folgewirkungen haben, die noch nicht vollständig absehbar sind.

- Über gewachsenem Boden, in Bereichen starker Bodensenkung, also insbesondere in Teilen der Erft-Aue zwischen Erftstadt und Bedburg, wird infolge verminderter Grundwasser-Flurabstände eine Vernässung größerer, mittlerweile dicht besiedelter und infrastrukturell genutzter Bereiche (z.B. Autobahn A 61) eintreten, sofern keine dauerhaften Wasserhaltungsmaßnahmen (Ewigkeitslasten) getroffen werden.
- Über Innenkippen wird es infolge des Grundwasseranstiegs zu mehr oder weniger ausgeprägten Nachsetzungen und Sackungen kommen, die umso stärker ausfallen, je mächtiger die Kippenmassive sind. Es muss hier mit Senkungsbeträgen von einigen Dezimetern bis zu 8 Meter und mehr gerechnet werden. Ob es bei Kippen im Rheinischen Revier zu ähnlichen Bodenverflüssigungen wie im Lausitzer Braunkohlenrevier kommen kann, scheint bislang nicht hinreichend untersucht worden zu sein. Hier wären u.a. sedimentpetrographische Vergleiche (Korngrößenverteilungen, Kornformen) zu empfehlen.
- Während der Flutung der Tagebaurestlöcher und dem Wiederanstieg des Grundwassers sind die Tagebauböschungen gefährdet, weshalb angepasste Wasserhaltungs-Regime vorgesehen sind. Aber auch für die Tagebausohle muss während des Wiederanstiegs des Grundwasserdrucks in den Liegendgrundwasserleitern für alle durchlaufenen Zustände das Sicherheitskriterium gegen hydraulischen Grundbruch eingehalten werden. Käme es zum Sohlaufbruch, so könnte dies ein katastrophales Nachrutschen von Tagebauböschungen zur Folge haben. In diesem Fall wären besonders Orte in Randlage zum Tagebau gefährdet.
- Während der Sümpfung, insbesondere in der Erft-Scholle, wurden/werden große Massen Wasser entfernt, wodurch die gebirgsmechanisch wirkende Auflast auf der Tertiärbasis deutlich gemindert wird. Durch die bevorstehende Flutung und den Wiederanstieg des Grundwassers erfolgt danach eine starke Wiederbelastung des tieferen Untergrunds. Dies könnte zur Auslösung von seismischen Ereignissen hoher Magnitude führen. Entsprechende Studien scheinen bislang zu fehlen.
- Aufgrund der Oxidation von Pyrit (FeS_2) wird es in Kippenmassiven, aber auch in belüfteten Randbereichen um die Tagebaue herum, zur Bildung von sulfatreichen Grundwässern kommen, die auf Jahrhunderte hinaus eine Nutzung des Grundwassers zumindest stark einschränken werden. Die im Tagebau Garzweiler praktizierten Kalkzugaben zu dem verkippten Abraum erfolgen nicht nach stöchiometrischen Säure-Base-Verhältnissen, sondern nach empirischen Gesichtspunkten, die lediglich von einer Teiloxidation des Pyrits ausgehen. Die belüfteten Bereiche des gewachsenen Nebengebirges können sowieso nicht gekalkt werden. Es ist daher mittelfristig, trotz Kalkung, auch mit Versauerungen zu rechnen. Dort, wo saure und Fe(II)-reiche Grundwässer wieder in oxidierende Bereiche eintreten (Quellen, Brunnen, Vorfluter), wird es zu Verockerungen kommen, also zur Ausfällung von Eisen(III)oxidhydraten.

- Bei der Flutung des zuvor entwässerten, d.h. belüfteten Porenraums des Nebengebirges wird die eingedrungene Luft wieder verdrängt. Diese kann nun aber erhebliche Mengen anderer Gase, insbesondere CO_2, Methan und auch Radon enthalten. Die Austrittspunkte dieser Entgasungsströme sollten identifiziert und bei Bedarf chemisch bzw. radiologisch überwacht werden.

Weiter sollen auch folgende Fragen beantwortet werden:

- **Wie hat sich bzw. wird sich voraussichtlich der Stand des Grundwassers im Zuge der Einstellungen der Sümpfungsmaßnahmen entwickeln?**
- **Wie hoch wird bzw. ist das Grundwasser in den von Absenkungen betroffenen Gebieten im Verhältnis zur Flur beim Wiederanstieg ansteigen bzw. angestiegen?**

Bisher scheinen nur wenige Erfahrungen über den Wiederanstieg des Grundwassers vorzuliegen. Diese betreffen vor allem den Bereich der südlichen Ville und den Bereich Zukunft-West. Doch auch in diesen Bereichen ist, wegen der in der Rur- und Erft-Scholle weiter stattfindenden Sümpfungen, der stationäre Endzustand noch nicht erreicht.

Man muss hier zwei Phänomene auseinanderhalten:

Zum einen liegt eine großräumige Bodensenkung vor, die dazu führt, dass auch das Niveau der Vorfluter mit abgesenkt worden ist. In Bereichen mäßiger (< 1 m) Bodensenkungen wird sich daher am Grundwassergefälle nur wenig ändern, denn der neue Grundwasserspiegel wird zwar topographisch etwas tiefer liegen, aber ebenso die Geländeoberfläche und die Vorflut. Die Grundwasserflurabstände sollten daher wieder die vorbergbaulichen Werte (Bandbreiten) erreichen.

Zum anderen werden sich aber die ausgedehnten Tagebaurestseen stark auf die Grundwasserverhältnisse in ihrem Umfeld auswirken, weil deren Wasserkörper mit dem Grundwasser kommunizieren. Insbesondere wird über die gesamte Seefläche und das angrenzende Grundwasser eine horizontal ebene Äquipotentialfläche erzwungen. Im Bereich des höheren Ufers wird der Grundwasserspiegel daher auf See-Niveau heruntergezogen, im Bereich des seichteren Ufers wird tendenziell eine Aufstockung des Grundwassers erfolgen und geringe Grundwasserflurabstände können dort die Folge sein.

In diesem Zusammenhang ist eine weitere Frage wichtig, nämlich ob sich die Zielpegel der Restseen so wie geplant einstellen lassen. Hier scheint zumindest eine gewisse Skepsis angebracht. Der Blausteinsee (Restloch des Tagebaus Zukunft-West) scheint Wasser zu verlieren und ohne Fremdwasserzufuhr das Stauziel nicht dauerhaft halten können. Dies ist im Grunde genommen nicht verwunderlich, weil im Bereich der Tagebaue sämtliche Grundwasserstauer durch den Bergbau entfernt und allenfalls durch Kippenmassive ersetzt worden sind, die aber selbst auch hydraulisch durchlässig sind. Zudem besteht ein hydraulisches Gefälle zwischen den jeweils höher gelegenen zu den tiefer gelegenen Seen.

Ein solches Gefälle besteht dann zukünftig möglicherweise analog auch für den Indensee zum Hambach-See und zum Garzweiler-See. Ob die dazwischen liegenden Störungen für die angeschnittenen Grundwasserleiter eine effektive hydraulische Trennung der Rur-Scholle von der Erft-Scholle, bzw. der Rur-Scholle von der Venloer Scholle bewirken können, ist fraglich.

Der Hambach-See hat seinen Überlauf (Wiebach) nur wenige Meter oberhalb des Niveaus der Erft als Vorfluter. Im Bereich der Erft-Aue werden aber die stärksten Bodensenkungen eintreten, mit der Notwenigkeit zur dauerhaften Wasserhaltung. Je tiefer das durch diese Wasserhaltungs-Maßnahmen eingestellte Grundwasserniveau im Bereich der Erft-Niederungen, desto höher wird das Druckgefälle vom Hambach-See dort hin, und desto größer

werden die der Erft zuströmenden Wasserzuflüsse, die gehoben werden müssen. In diesem Bereich ist die Entwicklung der Flurabstände daher nicht gut prognostizierbar und letztlich vom betriebenen Wasserhaltungsaufwand abhängig. Künftig sollten dort möglichst keine Bauwerke mehr errichtet werden, beziehungsweise die zu erwartenden Entwicklungen bei allen Planungen berücksichtigt werden. Mit Blick auf den Wasserhaltungsaufwand sollten Varianten geprüft werden, die eine Einleitung des Hambachsee-Abflusses weiter flussabwärts in die Erft vorsehen. Auch sollte erwogen werden, auf den Inden-See zu verzichten, um durch Verfüllung des Restlochs den Grundwasserandrang zum Hambachsee zu verringern.

Ein besonderes Problemgebiet stellen die Erft-Auen im zentralen Absenkungsbereich mit Bodensenkungen über 1 Meter dar (Siehe unten).

- **Wie hat sich der Flurabstand in den betroffenen Gebieten seit Beginn des Braunkohleabbaus in der Region verändert? Wie wird er sich nach dem Wiederanstieg des Grundwassers voraussichtlich einstellen?**

Der Flurabstand hat sich teilweise dramatisch vergrößert. Nur dort wo Grundwasserstauer den Erhalt schwebender Grundwasserkörper begünstigt haben und wo Versickerungsmaßnahmen (von Sümpfungswasser) zur Grundwasseranreicherung durchgeführt werden, sind in Oberflächennähe in etwa natürliche oder naturähnliche Verhältnisse erhalten geblieben.

In Abbildung 70 ist das Kerngebiet der Grundwasser- und Bodenabsenkungen dargestellt. Die rote bzw. rosa Umrisslinie markieren jene Teile der Erft-Aue, in welchen bereits 1955 geringe Grundwasserflurabstände kleiner 10 m bzw. kleiner 3 m vorlagen. Auch diese Grundwasserstände waren bereits das Ergebnis der früheren „Melioration“, die das ehemalige Sumpfgebiet landwirtschaftlich nutzbar gemacht hatte. Dieses Gebiet liegt seinerseits im Kernbereich der späteren Sümpfungsmaßnahmen für die Tagebaue in der Ville sowie Hambach und Garzweiler, welcher in Abbildung 70 durch die hellblau markierten Grundwasserabsenkungen ≥ 20 m (gegenüber 1955) für die Jahre 1961, 1969, 1980, 1983, 1989, 1990, 2000, 2012 und 2013 für den obersten Grundwasserleiter umrissen wird. Man erkennt, dass dieser (hellblau umrissene) Bereich sich seit den 1960er Jahren fast nicht mehr vergrößert hat. Dort sind die höheren Grundwasserstockwerke bis hinab zum betrieblichen Liegenden der Tagebaue praktisch vollkommen leer gepumpt

Ganz anders verlief und verläuft die Entwicklung in den tieferen Grundwasserstockwerken, besonders innerhalb der Erft-Scholle. Hier entstand zunächst am Nordostrand der Erftscholle ein tiefer Absenkungstrichter aufgrund der Sümpfungsmaßnahmen für die Tagebaue Fortuna-Garsdorf und Bergheim. Mit Aufnahme der Sümpfungsarbeiten für den Tagebau Hambach hat sich dieser Absenkungstrichter weiter vertieft und zum Nordostrand des Tagebaus Hambach verlagert (Vgl. Abbildung 37). Bis 2030/2045 wird sich dieser Absenkungstrichter weiter vertiefen und entlang des Randes des Tagebaus Hambach nach Südosten, bis in die Nähe von Heppendorf verlagern.

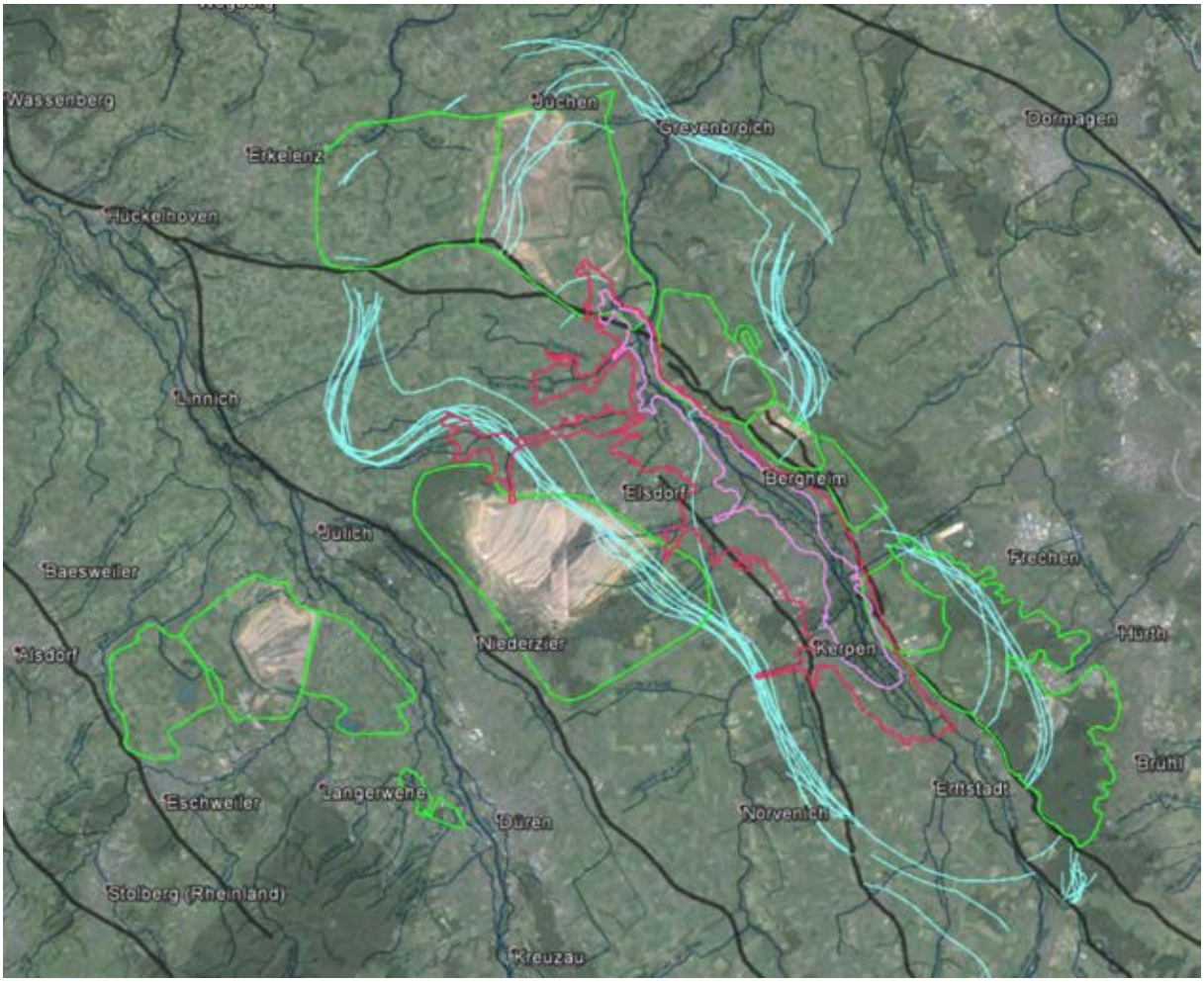


Abbildung 70 – Grundwasserabsenkungen ≥ 20 m (gegenüber 1955) für die Jahre 1961, 1969, 1980, 1983, 1989, 1990, 2000, 2012 und 2013 (hellblaue Linien). Grundwasserflurabstände im Jahr 1953 < 10 m (rot) und < 3 m (rosa). Umrisse der Braunkohlenabbaue (grün), Fließgewässer (dunkelblau), Hauptverwerfungen (schwarz). Kartengrundlage Google Earth.

Nach dem Wiederanstieg des Grundwassers werden sich in den Tagebau-ferneren Bereichen mit geringen Bodensenkungen mehr oder weniger vorbergbauliche Flurabstände einstellen. In Richtung auf die verkippten Tagebaue und gefluteten Restlöcher wird die veränderte hydrogeologische Situation einen Niveauausgleich auf Höhe des jeweiligen Seespiegels bewirken, weil in diesen Bereichen die hydrostratigraphische Stockwerkstrennung verloren gegangen ist und horizontale Äquipotentialflächen die Folge sein werden. Die verkippten bzw. gefluteten Tagebaue haben in ihren Einflussbereichen also eine nivellierende Wirkung auf den Grundwasserspiegel. Dies hat zur Folge, dass im Bereich der topographisch hohen Ufer hohe, im Bereich der niederen Ufer seichte Flurabstände resultieren.

Erft-Scholle:
In der Erft-Scholle entspricht aktuell der Grundwasserflurabstand großenteils dem abgesenkten Grundwasserspiegel des Liegendgrundwasserleiters (Horizont 5) des Tagebaus Hambach. Wegen der weiter andauernden Sümpfung für den Tagebau Hambach wird sich die Absenkung des Grundwassers in der Erft-Scholle bis zur Erreichung des tiefsten Abbau-Niveaus noch bis ca. 2030/2045 fortsetzen. Bis dahin soll der Grundwasserspiegel am Ostrand des Tagebaus Hambach von derzeit -300 m NHN auf -365 m NHN (ca. 450 m unter Flur) weiter abgesenkt werden.

In der Nachbergbauphase werden im Bereich starker Bodensenkungen in der Erft-Aue die Flurabstände durch die Wasserhaltung bestimmt werden. Ohne Wasserhaltung müsste bereits zu Zeiten normaler Wasserführung mit großflächigen Vernässungen oder Überflutungen gerechnet werden. Dies betrifft insbesondere den Erft-Abschnitt zwischen Kerpen und Bedburg. Nach Aussagen von RWE (mündliche Auskünfte Prof. Forkel bzw. Dr. Rinaldi) wird mit einem zukünftigen Sümpfungsaufwand von 80 bis 100 Millionen m^3/a gerechnet. Dies entspricht für eine angenommene Förderhöhe von 5 Metern einer mittleren Pumpleistung von ca. 200kW, bzw. 1,75 Millionen kWh/a. Die reinen Energiekosten würden sich demnach bei heutigen Strompreisen auf ca. 500.000 Euro/Jahr belaufen. Hinzu kommen jedoch die Invest-, Unterhaltungs- und Personalkosten, die anhand konkreter Planungen zu ermitteln wären.

Ob das aus den Erft-Auen gehobene Grundwasser genutzt werden kann, ist sehr fraglich. Aufgrund der umgebenden verfüllten und gefluteten Tagebaue ist mit chemischen Beeinflussungen durch Kippenwässer zu rechnen, die allerdings gebietsweise unterschiedlich stark sein können.

Der Entwässerungsaufwand setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen:

- Anteil entsprechend den vorbergbaulichen Entwässerungsmaßnahmen der „Genossenschaft für die Melioration der Erftniederung“. Dieser Aufwand sollte sich aus historischen Unterlagen ermitteln lassen, die bei zuständigen Behörden vorhanden sein sollten. Der zukünftig (stationärer Endzustand) darüber hinaus gehende Sümpfungsaufwand bei gleichen vorbergbaulichen Flurabständen kann dem Bergbau zugeschrieben werden, und zwar wie folgt:
- Mehraufwand wegen verringerten Grundwasserflurabständen infolge von Bodensenkungen und Gefälleänderungen <u>zur Erft hin</u>. Dieser Mehraufwand resultiert aus höheren hydraulischen Gradienten zwischen dem stärker abgesenkten Vorfluter gegenüber den weiter entfernten Einzugsgebieten. Die Zunahme der hydraulischen Gradienten entspricht der Zunahme der geodätischen Gradienten.
- Mehraufwand wegen verringerten Grundwasserflurabständen infolge von Bodensenkungen und Gefälleänderungen <u>entlang des Erft-Verlaufs</u>. Das Gefälle der Erft wird zwischen Bergheim und Bedburg infolge der unterschiedlichen Bodensenkungen stark herabgesetzt, auf Werte von nur noch ca. 1:9.000. Hierdurch vermindert sich der Erft-parallele Grundwasserabstrom und es kommt zu einem flussaufwärts zunehmenden Anstau. Als Folge stellen sich verminderte Flurabstände ein und ein erhöhtes Risiko für Überflutungen in Hochwasser-Perioden wird erwartet.
- Mehraufwand durch höheren Andrang von Grundwasser durch Veränderungen des geologischen Untergrundes sowie durch gesammeltes Überlaufwasser des Hambach-Sees in die Erft als Vorfluter. Durch die Entfernung der Grundwasserstauer im Tagebau

Hambach kann Grundwasser aus tieferen Grundwasserleitern leichter aufsteigen und in den Hambachsee entlasten. Aufgrund der höher gelegenen Speisungsgebiete dieser Liegend-Grundwasserleiter besteht ein entsprechendes, aufwärts gerichtetes Druckgefälle.

An dieser Stelle sei auf eine missverständliche Darstellung in Forkel (2011) hingewiesen. Siehe Abbildung 71:

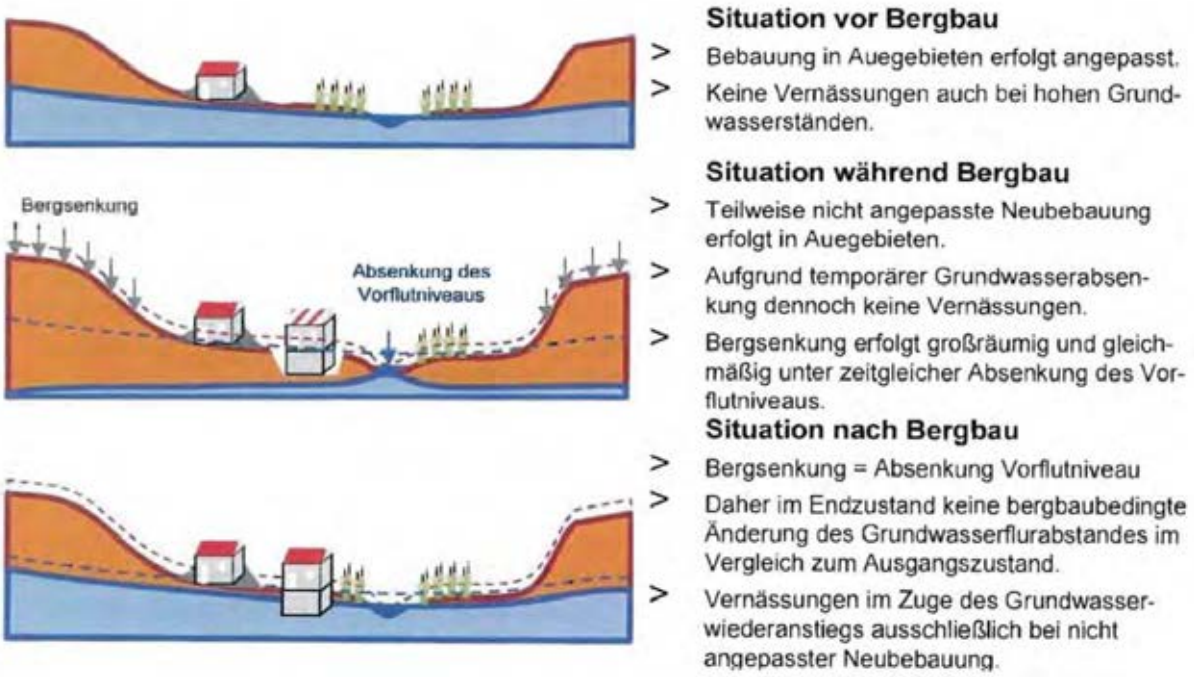


Abbildung 71 – Missverständliche Skizze aus Forkel (2011) zu den Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs in Gebieten mit Bergsenkung.

Die Skizze ist insoweit zutreffend als sie darauf hinweist, dass man in Gebieten mit temporär abgesenktem Grundwasser nur so bauen sollte, dass auch beim Wiederanstieg des Grundwassers keine Beeinträchtigungen des Bauwerks entstehen können.

Die Skizze und der Text suggerieren aber auch, dass die Bodensenkungen großräumig und „gleichmäßig“ erfolgen und der Vorfluter mit abgesenkt wird, das ganze Ensemble sozusagen nur um einige Meter nach unten parallelverschoben wird.

Tatsächlich sind die Grundwasserabsenkungen und folglich auch die induzierten Bodensenkungen aber trichterförmig. Durch die Trichterform senkt sich der Boden ungleichmäßig und die Bodenneigung vergrößert sich zum Senkungsmaximum hin, und nicht notwendigerweise zum Vorfluter hin. Die hydraulischen Gradienten vergrößern sich in Richtung des entstandenen tiefsten Geländepunktes, der in flachem Gelände in der Nähe des Senkungsmaximums liegen wird. Vergleiche Abbildung 72.

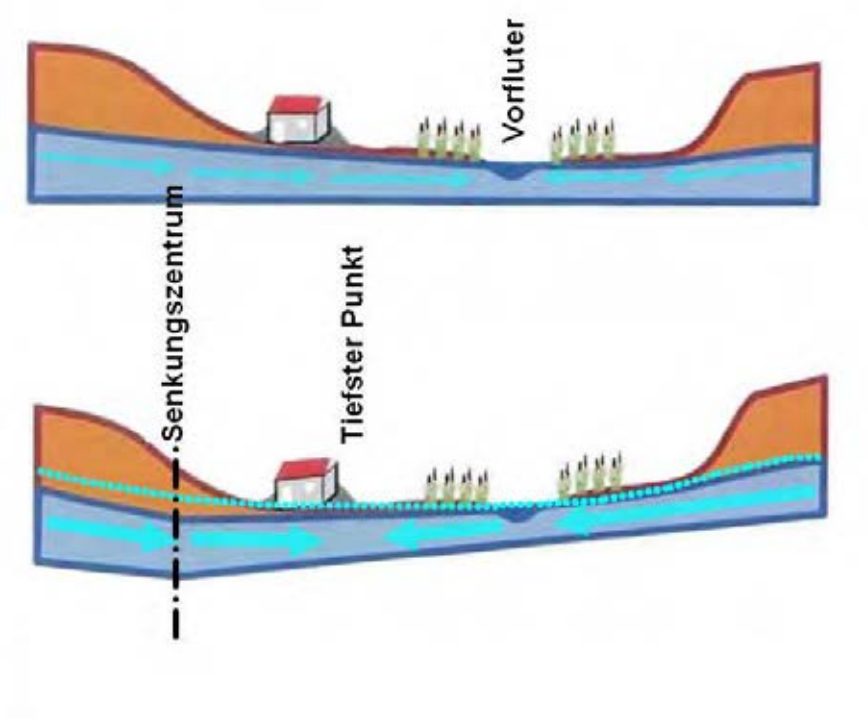


Abbildung 72 – Sichtweise des Verfassers. Nach dem Wiederanstieg wird das Grundwasser in Richtung des tiefsten Punktes strömen. Dies muss nicht mehr der alte Vorfluter sein. Außerdem wird der Grundwasserandrang aufgrund des steileren hydraulischen Gefälles zunehmen. Damit ein Abfluss möglich ist, muss der Grundwasserspiegel auf das Vorflut-Niveau ansteigen. (Bildvorlage Forkel, 2011)

In dem gefällearmen Abschnitt der Erft zwischen Bergheim und Bedburg wird sich das Gefälle weiter deutlich verringern und zu fast stagnierenden Verhältnissen führen. Ob in Hochwasserperioden die Wasserhaltungsmaßnahmen überhaupt in der Lage sein werden, Überschwemmungen zu verhindern, wird in Frage gestellt. Hochwasser-Situationen könnten durch den großflächigen Hambach-See stark beeinflusst werden, weil dieser bei Starkregen-Ereignissen sofort zu einem stark zunehmenden Überlauf in die Erft führen würde. Es sollte daher geprüft werden, wie der Überlauf regelbar gestaltet werden kann, damit Niederschläge im See zwischengespeichert und dann kontrolliert in den Vorfluter abgeleitet werden können. Im Bereich des niedrigsten Seeufers müsste auch bei hohen Wellen ein ausreichender Freibord eingehalten werden, damit eine Überflutung der „Dammkrone“ und Breschenbildung ausgeschlossen sind.

Rur-Scholle:

In der Rur-Scholle ist der Sümpfungseinfluss durch den Tagebau Inden maßgebend. Die Absenkung des Grundwassers erreicht zwar wegen der geringeren Abbautiefe bis -134 m NHN (230 m unter Flur) nicht die Ausmaße wie in der Erft-Scholle, doch ist im oberen Grundwasserstockwerk nach Nordwesten hin ein Einfluss bis zur holländischen Grenze festzustellen. Dort liegen immer noch Grundwasserspiegel-Differenzen (gegenüber 1955) von ca. 1 Meter vor. Stärkere Absenkungen von mehr als 5 Meter sind nur in der näheren Umgebung des Tagebaus Inden festzustellen. Im Jahr 2013 sind auch immer noch Einflüsse des Tagebaus Zukunft-West feststellbar, trotz Erreichung des Flutungsziels für den

Blausteinsee. Diese besonders westlich bis nördlich des Tagebaus Zukunft-West zu messenden Absenkungen des Grundwassers könnten teilweise permanent sein, wegen der veränderten hydrogeologischen Verhältnisse im Kippenbereich dieses Tagebaus.

Weitreichender sind die Sümpfungseinflüsse auf die tiefen Grundwasserleiter der Rur-Scholle. Diese reichen im Rur-Graben bis in die Niederlande (Zentral-Limburg) hinein. Nach Ende des Bergbaus sollten sich in den tiefen Grundwasserleitern aber die vorbergbaulichen Verhältnisse im Wesentlichen wieder einstellen.

Venloer Scholle:
Auch in der Venloer Scholle sind die Auswirkungen der Sümpfung, hier für den Tagebau Garzweiler, sehr ausgeprägt (Abbildung 73), wenn auch geringer als die in der Erft-Scholle. Dies liegt einerseits an der vergleichsweise geringeren Abbau- und Sümpfungs-Tiefe bis -140 m NHN (210 m unter Flur), andererseits an der praktizierten Grundwasseranreicherung über Grundwasserstauern, besonders dem Reuver-Ton (Abbildung 73). Die Grundwasseranreicherung verhindert starke Veränderungen der Grundwasserflurabstände.

Nach Ende der Bergbautätigkeit (2045) könnte jedoch die Grundwasseranreicherung schwierig werden, weil die Wassermengen aus der Sümpfung entfallen, gleichzeitig konkurrierende Nutzungsansprüche an die dann knappen und qualitativ schlechten Grundwasservorkommen hinzukommen und der Zeitraum bis zur Wiederherstellung vorbergbaulicher Grundwasserstände am Ende des Jahrhunderts überbrückt werden muss.

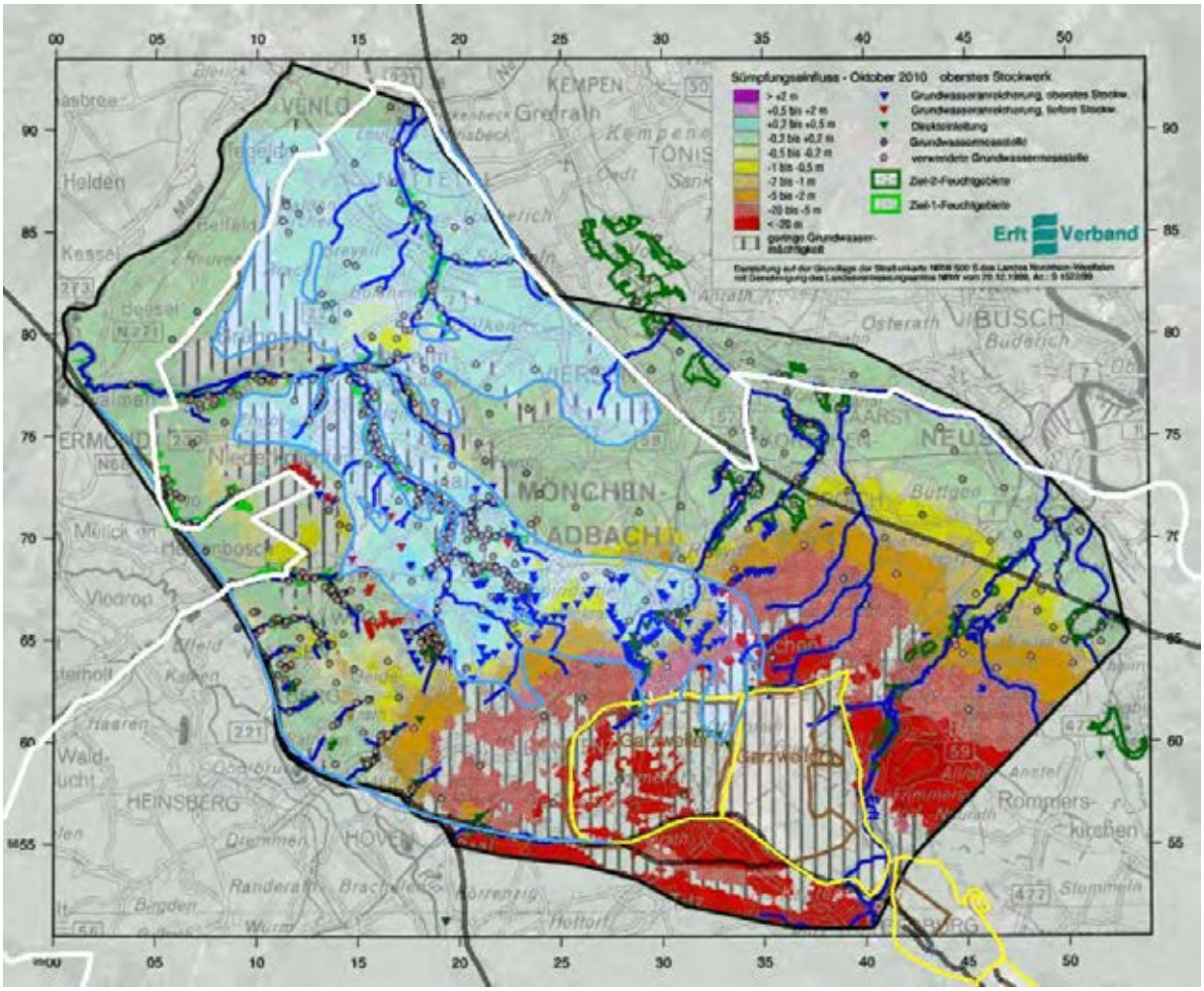


Abbildung 73 – Sümpfungseinfluss (Oktober 2010) des Tagebaus Garzweiler und Grundwasseranreicherung durch Schluckbrunnen. (Kartengrundlage: BezReg Köln 2013, nach Erftverband). Verbreitung des Reuver-Tons (hellblau transparente Fläche) nach Thiede (1991).

- **In welchen Gebieten sind Gebäude oder könnten sie zukünftig vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffen sein? Und worauf ist dies zurückzuführen?**

Gebäude und Bauwerke im weiteren Sinn können in unterschiedlicher Weise vom wieder ansteigenden Grundwasser betroffen werden:

Bodenbewegungen des Baugrundes:
Bergschäden an Bauwerken entstehen häufig durch Bewegungen im Baugrund, die zu ungleichmäßigen Setzungen, Zerrungen und/oder Schiefstellungen führen können. Zu den Risikofaktoren zählen hydraulisch wirksame Störungen und heterogene Bodeneigenschaften im Baugrund, z.B. Torf oder Ton-Linsen.

Böschungsrutschungen in Randlagen zu Restlöchern:
Die Standsicherheit von Böschungen an Tagebaurändern ist grundsätzlich immer nachzuweisen (Petri und Stein 2012). Steile Böschungen werden häufig auch durch Anschüttungen abgeflacht. Trotzdem kommt es im Braunkohlenbergbau nicht selten zu Böschungsrutschungen, insbesondere während des Grundwasserwiederanstiegs. Dies wirft Fragen hinsichtlich der Eignung der verwendeten bzw. vorgeschriebenen Berechnungsverfahren auf, z.B. ob alle hydraulischen Kräfte angemessen berücksichtigt werden. Eine Böschungsrutschung kann auch als Sekundärreaktion in Folge eines Sohlaufbruchs (hydraulischen Grundbruchs) erfolgen, wenn am Böschungsfuß das Widerlager verloren gegangen ist. Solche mehrphasigen Versagensfälle scheinen nicht betrachtet zu werden.

Abbildung 74 –Blick nach Osten auf die Randböschung (links) des Tagebaus Hambach und die Ortslage Elsdorf (oben). (Aus Petri und Stein 2012)

Bodenverflüssigung in Kippen:
Die Bodenverflüssigung in Kippenmassiven beim Anstieg des Grundwassers ist besonders im Lausitzer Braunkohlenrevier ein bekanntes Phänomen. Dort spielen ungünstige Korngrößenverteilungen und Kornformen eine wichtige Rolle. Es konnten keine Untersuchungen zu dieser Problematik im Rheinischen Braunkohlenrevier recherchiert werden.

Auftriebswirkung des ansteigenden Grundwassers:
Bei Bauwerken im Grundwasser ist dessen Auftriebswirkung auf die Bauwerke zu berücksichtigen. Beispielsweise kann das Eigengewicht einer Betonwanne nicht ausreichen um ein Aufschwimmen bei ansteigendem Grundwasser zu verhindern. Besonders gefährdet sind auch Tunnelbauten, Rohrleitungen, unterirdische Tanks etc.

Es ist hier nicht bekannt, inwieweit in den gesümpften Gebieten, insbesondere in den Erft-Auen, bei Bauanträgen ein entsprechender Nachweis verlangt wird.

Entstehung von neuen oder Ausweitung von früheren Überschwemmungsgebieten:
Auf die Gefälleänderungen der Erft im Abschnitt zwischen Bergheim und Bedburg wurde bereits hingewiesen. In dem bereits gefällearmen Abschnitt werden infolge der Bodensenkungen fast stagnierende Verhältnisse eintreten, wodurch in Hochwasserperioden Überschwemmungen erwartet werden müssen. Die Situation könnte durch den großflächigen Hambach-See weiter verschärft werden, weil dieser bei Starkregen-Ereignissen sofort zu einem stark zunehmenden Überlauf in die Erft führen wird, sofern keine geeignete Bauwerke zur Kontrolle des Abflusses vorgesehen werden. Es sollte daher geprüft werden, ob und unter welchen Voraussetzungen in den betroffenen Gebieten der Erft-Auen weitere Bebauungen zugelassen werden können.

Chemische Angriffe auf Baustoffe, z.B. in Form von Betonaggressivität durch erhöhte Sulfatkonzentrationen oder saure pH-Werte.
Beton bzw. Zementstein ist gegenüber bestimmten Medien nicht beständig. Hierzu zählen auch erhöhte Sulfatkonzentrationen im Grundwasser. Nach DIN 4030 gelten Sulfatkonzentrationen von 200 bis 600 mg/L SO4 als schwach angreifend, zwischen 600 und 3000 mg/L SO4 als mäßig angreifend, und von 3000 bis 6000 mg/L SO4 als stark angreifend.

Die schädigende Wirkung des Sulfats beruht auf der Neubildung von sulfathaltigen Treibmineralen wie Gips, Ettringit oder Thaumasit, die das Betongefüge zerstören (Mulenga 2002).

In Bereichen wo mit sulfathaltigen Kippenwässern zu rechnen ist, sollten bei Neubauten sulfatbeständige Spezial-Zemente eingesetzt werden. Bei bestehenden Bauwerken muss unter Umständen mit Schäden gerechnet werden.

Es würde hier sicher zu weit führen einzelne Ortschaften, Ortsteile oder gar Gebäude aufzulisten, die von wiederansteigendem Grundwasser gefährdet werden könnten. Es wird jedoch auf das Kartenwerk des Landesgrundwasserdiensts NRW (1954) über Grundwasserstände unter Flur, Stand November 1953, hingewiesen. Die topographische Grundkarte gibt gleichzeitig Auskunft über die bebauten Flächen vor Beginn des modernen Braunkohlenbergbaus. Für die seither hinzu gekommenen Bebauungen wäre eine Überprüfung der jeweiligen Standorte anhand der Flurabstände von November 1953 aufschlussreich.

- **In welcher Form kann sich die Wasseraufnahme des Bodens durch die Absenkungen auf Grund der Sümpfungen verändern bzw. verändert haben? Mit welchen Herausforderungen ist in diesem Zusammenhang bei vermehrten Starkregenereignissen zu rechnen, wie sie auf Grund des Klimawandels zu befürchten sind?**

Hier sind mehrere Effekte zu unterscheiden.

- In der grundwassergesättigten Zone wird sich infolge der irreversiblen Kompaktion der Sedimente der Porenraum bzw. die Porosität verringern. Der Verlust an Porenraum entspricht dabei volumetrisch der Bodensenkung. Wenn beispielsweise bei einer Grundwasserabsenkung um 100 m die Bodensenkung 1,5% bzw. 1,5 m beträgt und die ursprüngliche Porosität 10% betrug, so ist die neue Porosität noch 8,5%. – Für die gesättigte Zone werden keine Auswirkungen auf wetter- und klimabedingte Ereignisse erwartet.
- Bei einer Verringerung des Grundwasserflurabstands verringert sich auch die temporäre Speicherkapazität (Rückhaltevermögen) in der ungesättigten Zone. Dadurch ist mit schneller auflaufenden höheren und häufigeren Hochwasserspitzen zu rechnen. Die geplanten großflächigen Tagebaurestseen können in diesem Zusammenhang als Extremfälle mit Totalverlust der ungesättigten Zone betrachtet werden.
- In der ungesättigten Zone kann es zu Austrocknungen und damit verbundenen Gefügeveränderungen kommen, ebenso zum Verlust humoser Bestandteile durch aerobe Abbauprozesse und zu Veränderungen der Grenzflächeneigenschaften, Poren- und Kapillarräume (Verdichtung, Hydrophobisierung). Das kurzfristige Aufnahme- und Rückhaltevermögen für Niederschlagswasser kann sich dadurch verringern und es kann zu verstärkter Anfälligkeit gegenüber Bodenerosion kommen. – Ob solche Austrocknungen jedoch ursächlich mit der bergbaulichen Sümpfung zu tun haben, müsste im Einzelfall belegt werden.

- **In welchen Ortschaften oder Ortsteilen gibt es Gebäude, die vor dem Beginn der Sümpfung errichtet wurden und jetzt vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffen sind oder in Zukunft sein könnten? Und worauf ist dies zurückzuführen?**

Dieser Fragestellung kann man sich am besten durch Heranziehung historischer Kartenwerke nähern, welche die Bebauung vor Beginn der umfangreichen Sümpfungsmaßnahmen, also vor 1955 abbilden. Hier ist besonders die (leider vergriffene) Karte der Grundwasserflurabstände aus dem Zeitraum 1953/1954 (Landesgrundwasserdienst NRW, 1954) sehr nützlich, auf die hier ausdrücklich verwiesen wird. (Eine Neuauflage in digitalem Format, die unter anderem auch bei der Bergschadensstelle der Bezirksregierung Köln online abrufbar sein sollte, wäre zu empfehlen.)

Im Sinne der Fragestellung betroffen sind Gebäude in Gebieten mit starken Bodenabsenkungen. Grundwasserstände unterliegen auch natürlichen, niederschlagsbedingten Schwankungen, die sich im Meterbereich abspielen können, wie die Ganglinien zahlreicher nicht bergbaulich beeinflusster Brunnen beweisen. Daher sollen hier nur Gebiete mit Bodenabsenkungen größer 1 Meter in Betracht gezogen werden. Eine Übersichtskarte hierzu ist in Abbildung 56 reproduziert. Man erkennt, dass im Wesentlichen der Bereich der Erft-Auen zwischen Erftstadt und Bedburg betroffen ist.

Die Ursachen sind die starken irreversiblen Bodenabsenkungen, die Gefälleänderungen entlang der Erft, der vermutlich verstärkte Grundwasserandrang zur tiefer liegenden Erft, das verloren gegangene Rückhaltevermögen für Niederschläge über den Tagebauseen, sowie die veränderten Grundwasserstände infolge der nivellierenden Wirkung des Hambach-Sees.

- **Welche Arten von Auswirkungen auf das Trinkwasser sind durch den Wiederanstieg des Grundwassers zu erwarten?**

Soweit mit Trinkwasser hier nutzbares Grundwasser gemeint ist, so ergeben sich gravierende Mengenprobleme wie auch Qualitätsprobleme.

Die Mengenprobleme resultieren aus dem künftigen Wegfall des bisher wasserwirtschaftlich genutzten Sümpfungswassers, dem weitgehenden Verlust der vorbergbaulich verfügbaren Grundwasserressourcen, sowie der Qualitätsverschlechterungen bei den verbliebenen bzw. durch Flutung mit Flusswasser wieder hergestellten Grundwasserkörpern.

Die Qualitätsprobleme haben ihre Ursache einerseits in der Pyritoxidation in den Kippen und den belüfteten Aquiferen, die zu sulfatreichen und teilweise auch zu sauren, eisen- und schwermetall-reichen Grundwässern führen, die für eine Nutzung als Trinkwasser ungeeignet sind.

Andererseits ist durch die Flutung der Restlochseen und Aquifere mit ungereinigtem Flusswasser zu erwarten, dass auf diesem Weg vielfältige Schadstoffe in die Grundwasserleiter eingeschleppt werden. Die bei natürlicher Grundwasserneubildung stattfindende Reinigung des Wassers im meteorologischen Wasserkreislauf durch Verdunstung und Kondensation sowie durch die Filterwirkung der Böden und Bodenorganismen entfällt.

Speziell bezogen auf Korschenbroich wurden folgende Fragen gestellt:

- **Welche Erkenntnisse gibt es darüber, ob es und wo es Absenkungen infolge der Jahrzehntelangen Sümpfungsmaßnahmen im Gebiet um Korschenbroich gegeben hat?**
- **Welche Erkenntnisse gibt es darüber, dass es zu Absenkungen in den betroffenen Gebieten in Korschenbroich gekommen ist, die auf die ursprünglichen Sümpfungsmaßnahmen zurückzuführen sind?**

Im Bereich Korschenbroich lagen ausweislich aller verfügbaren Jahresberichte des Erft-Verbandes ab 1961 die Grundwasserdifferenzen gegenüber 1955 stets zwischen null und maximal 2 Meter. Die daraus ableitbaren Bodensenkungen liegen daher maximal im Bereich weniger Zentimeter. Auch die Feinnivellements geben im Bereich von Korschenbroich keine Anhaltspunkte für Bodensenkungen.

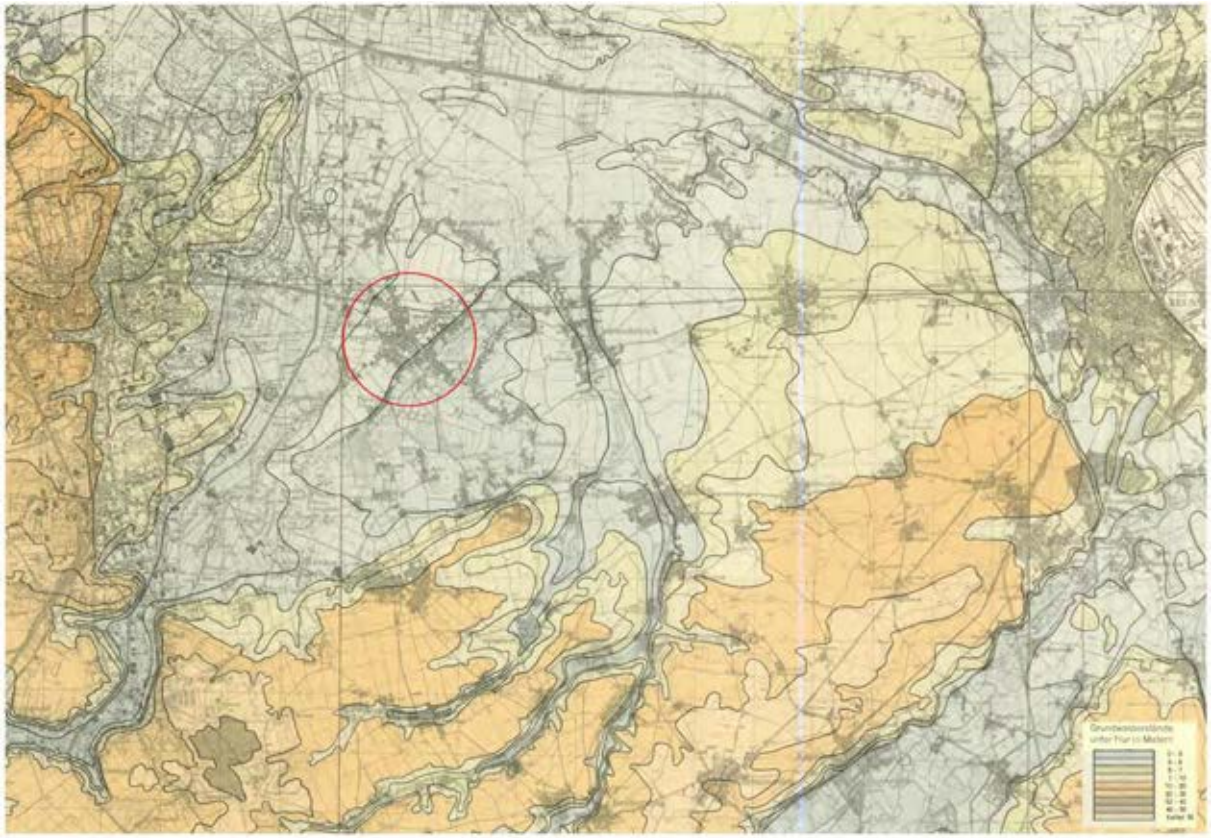


Abbildung 75 – Kartenausschnitt mit den Grundwasserflurabständen im Jahr 1954 (Landesgrundwasserdienst NRW 1954). Im Bereich Korschenbroich (roter Kreis) waren bereits damals Flurabstände zum Grundwasserspiegel zwischen 0 und 3 Meter (mittelgrau) bzw. 3 und 5 Meter (hellgrau) vorhanden.

Aus Abbildung 75 ist zu entnehmen, dass im Bereich Korschenbroich bereits in vorbergbaulicher Zeit sehr niedrige Grundwasserflurabstände, häufig zwischen 0 und 3 Meter, vorgelegen haben. Einziges Indiz für theoretisch denkbare Bodensenkungen sind (sehr geringe) lokale Torf-Vorkommen, die (ebenfalls rein theoretisch) eventuell eine Entwässerung und Aufzehrung erfahren haben könnten.

Quellenverzeichnis

Aachener Zeitung (2015) Blausteinsee: Kein Fass ohne Boden. Von: Rudolf Müller
Letzte Aktualisierung: 9. Januar 2015, 18:37 Uhr
http://www.aachener-zeitung.de/lokales/eschweiler/blausteinsee-kein-fass-ohne-boden-1.996652

Aachener Zeitung (2014) Tagebau Garzweiler II wird verkleinert. 28. März 2014,
http://www.aachener-zeitung.de/lokales/region/tagebau-garzweiler-ii-wird-verkleinert-1.794557#plx1173542827

Ahorner L (2001) Abschätzung der statistischen Wiederkehrperiode von starken Erdbeben im Gebiet von Köln auf Grund von geologisch-tektonischen Beobachtungen an aktiven Störungen. DGG-online, 2/2001.
http://www.dgg-online.de/mitteilungen/2001_2/ahorner.html

Ahorner L (1998) Möglichkeiten und Grenzen paläoseismologischer Forschung in mitteleuropäischen Erdbebengebieten. - DGEB-Publikation 9, Paläoseismologie, Eurocode 8 und Schwingungsisolierung (Hrsg. S.A. Savidis), S. 9-42.

Ahorner L (1962) Untersuchungen zur quartären Bruchtektonik in der Niederrheinischen Bucht. - Eiszeitalter und Gegenwart, 13: 24-105.

Anrufungsstelle Bergschäden (2014) Fachinformationen: Tektonische Störzonen in der Niederrheinischen Bucht. Geschäftsstelle der Anrufungsstelle Bergschaden Braunkohle NRW bei der Bezirksregierung Köln.
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/bergschaden/fachinformationen_tektonik.pdf)

Bachmann D, Becker B, van Linn A, Köngeter J (2007) Das Großraum-Grundwassermodell Rurscholle. Zeitschrift für Angewandte Geographie, 12, 26-36

Becker B und Asmus S (2005) Beschreibung und Korrelation der känozoischen Lockergesteinsschichten der Grundgebirgsbohrungen im Umfeld des Tagebaus Hambach. Scriptum 13, 61-74, Krefeld

Becker B, Klauder W, Reuther C, Köngeter J (2008) Modellierung der Randüberströme zwischen Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle durch Kopplung von Großraum-Grundwassermodellen. Grundwasser. 13, 15-26

BezReg Köln (2009) 10 Jahre Monitoring Garzweiler II – Tagungsband am 10. und 11. September 2009 in Mönchengladbach .
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/gremien/braunkohlenausschuss/monitoring/10jahre.pdf

BezReg Köln (2013) Monitoring Garzweiler II - Jahresbericht 2012. 60 S.
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/gremien/braunkohlenausschuss/monitoring/2012.pdf

BezReg Köln (2014) Anrufungsstelle Bergschäden
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/bergschaden/fachinformationen_tektonik.pdf)

BezReg Köln (2015) Überschwemmungsgebiete Teileinzugsgebiet Erft
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/leistungen/abteilung05/54/hochwasserschutz/ueberschwemmungsgebiete/erft/erft/index.html

BGR (2013) Energiestudie 2013. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (17). – 112 S., Hannover.
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2013.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Brunnacker (1986)

Bucher B (2012) Monitoring Garzweiler II. Bericht aus der Arbeitsgruppe Grundwasser. 146. Sitzung des Braunkohlenausschusses, 05.11.2012
https://www.bscw.nrw.de/pub/bscw.cgi/d4835464/TOP%2001%20Anlage%206.pdf

Bucher B (2010) Grundwasserentwicklung im Rheinland, gestern – heute – morgen. Bergschadensforum 15. März 2010, Niederziehr, Tagesband (Hrsg. RWE Power), S. 12-14.
http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/501410/data/60060/1/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/Tagungsband-des-Bergschadensforum-vom-15.03.2010.pdf

BUND (2005) Braunkohle und Grundwasser - Ein Bodenschatz wird geplündert. Hintergrundpapier, Dirk Jansen. BUND Landesverband NRW.
http://www.bund-nrw.de/themen_und_projekte/braunkohle/verweise/tagung_braunkohlentagebaue_und_gewaesserschutz/

Cremer N (2007) Die Nutzung tiefer Grundwasservorkommen der Hauptkies-Serie am NMiederrhein – Gründe, Vorteile und Probleme. Bochumer Grundwassertag 2007, 71-84

Cremer N und Hüsener (2009) Abraumkippen des Braunkohlenbergbaus – ein Problem für die Zukunft? Wasser und Abfall 9, 18-22

Cuvelier N (2005) Planung und Durchführung eines Bohrprogramms zur Erkundung des tiefen Untergrundes der Niederrheinischen Bucht. Scriptum 13, 7-31, Krefeld

DEBRIV (2015) Revierkarte Rheinisches Braunkohlenrevier.
http://www.braunkohle.de/index.php?article_id=98&fileName=rheinland.pdf

DEBRIV (2014) Braunkohle sorgt für Sicherheit und Effizienz / Neue Kraftwerke brauchen weniger Brennstoff / Anteil der Braunkohle an der Stromerzeugung stabil / Förderung leicht gesunken.
http://www.presseportal.de/pm/9341/2634226/braunkohle-sorgt-f-r-sicherheit-und-effizienz-neue-kraftwerke-brauchen-weniger-brennstoff-anteil

DEBRIV (2013) 3. Lagerstätten
http://www.braunkohle.de/index.php?article_id=98&fileName=03_lagerstaetten.pdf

DEBRIV (2013a) Schema eines Tagebaues im Rheinischen Revier
http://www.braunkohle.de/index.php?article_id=98&fileName=grafik40.pdf

De Vries J (2007) Groundwater - Geology of the Netherlands. Edited by Th.E. Wong, D.A.J. Batjes & J. de Jager. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007: 295–315
http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user_upload/groundwatergovernance/docs/Hague/Readings/Groundwater_De_Vries.pdf

Drebenstedt C und Rascher J (1998) Zu den geologischen Bedingungen und den bergbautechnologischen Möglichkeiten der Wiedernutzbarmachung im Lausitzer Braunkohlerevier. In: Jahrbuch Bergbaufolgelandschaft 1998 (Hrsg.: Dachverband Bergbaufolgelandschaft e.V. und Stiftung Bauhaus Dessau), S. 34 – 46 (ISBN 3-9805368-9-0)

Eichborn M (2010) Lokalisierung und Modellierung von Senkungen in einem Braunkohleabbaugebiet. Bachelorarbeit Universität Bonn.
http://www.igg.uni-bonn.de/tg/uploads/tx_ikgpublication/eichborn_10.pdf

Erftverband (1983) Jahresbericht 1983, Großer Erftverband

Erftverband (2013) Der Erftverband auf einen Blick.
http://ausbildung.erftverband.de/fileadmin/documents/downloads/ev-auf-einen-blick-2014.pdf

Erftverband (2013b) Wasserdargebot und seine Nutzung. Jahresbericht 2013
http://www.erftverband.de/fileadmin/user_upload/ev_jahresbericht_kap_1_web.pdf

Erftverband (2015) Diverse beim Erftverband angeforderte Shape-Dateien zur Geologie und zum Grundwasser.

Förster W (1994) Setzungen und Sackungen unter Deponien auf Kippen. Geotechnik im Deponiebau. Studien und Tagungsberichte, Band 1, S. 11-18. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam.

Forkel C (2011) Aspekte des Grundwasserwiederanstiegs im Rheinischen Revier. Dresdener Grundwassertage 2011, Proceedings des DGFZ e.V., ISSN 1430-0176, H45, Dresden. S. 137-150.

Gärtner D und Durchholz R (1998) Tagebau Inden – der „Inselbetrieb“ im Rheinischen Braunkohlenrevier. Braunkohle, 50, 145-153.

Gärtner D und Schlösser T (1999) Die Verlegung der Inde zwischen Inden-Lamersdorf und Jülich-Kirchberg. Braunkohle, 51, 181-189.

Gärtner D und Guder W (2002) 18 Jahre Tagebau Bergheim. Braunkohle, 54, 133-149.

Geologischer Dienst NRW (2007) Tertiär an Niederrhein und in Ostwestfalen.
http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/extern/stratigraphie/nrw/litho/tert/nrw_tertiaer.pdf)

Giese S (2010) Bodenbewegungen infolge von Sümpfungsmaßnahmen für tiefe Tagebaue am Beispiel des Rheinischen Braunkohlenreviers. Dissertation RWTH Aachen.
http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2010/3381/pdf/3381.pdf

Güldenpfennig J (2010) Kann man Bergschäden von Bauschäden unterscheiden? Bergschadensforum 15. März 2010, Niederziehr, Tagesband (Hrsg. RWE Power), S. 36-39.
http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/501410/data/60060/1/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/Tagungsband-des-Bergschadensforum-vom-15.03.2010.pdf

Gumm L (2011) A multi-tracer hydrochemical investigation of groundwater dynamics in the Lower Rhine Embayment, Germany. PhD-thesis, School of Environmental Sciences University of East Anglia.
https://ueaeprints.uea.ac.uk/33040/1/2011GummLPPhD.pdf

Hanisch J (2013) Expertengespräch Bezirksregierung Arnsberg. Standsicherheit der Böschungen des geplanten Restsees Tagebau Inden. Prüfung der Standsicherheit durch den Geologischen Dienst NRW, 19.09.2013
http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/presse/2013/09/204_13/joerg_hanisch.pdf

Haq B, Hardenbol J, Vail P (1987) Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science, 235: 1156-1167

Hempel R und Kulick L (2003) Planung und Steuerung des Tagebaus Hambach.
Bergbau 9 (2003), 398-407

Kalra A (2006) Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves.
Thesis, West Virginia University, Morgantown West Virginia

Kels H (2007) Bau und Bilanzierung der Lössdecke am westlichen Niederrhein. Dissertation, Universität Düsseldorf
http://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DocumentServlet?id=3628

Kircher M (2004) Analyse flächenhafter Senkungserscheinungen in sedimentären Gebieten mit den neuen Techniken der Radarfernerkundung - am Beispiel der Niederrheinischen Bucht. Dissertation, Universität Bonn, 129 S.
http://hss.ulb.uni-bonn.de/2004/0507/0507.pdf

Klett M, Eichhorst T, Schäfer A (2002) Facies interpretation from well logs applied to the Tertiary Lower Rhine Basin fill. In: A. Schaefer and A. Siehl (Editors), Rift tectonics and syngenetic sedimentation; the Cenozoic Lower Rhine Basin and related structures. Geologie en Mijnbouw. Netherlands Journal of Geosciences. 81; 2, Pages 167-176. https://comp1.geol.unibas.ch/downloads/schaefer.pdf

Klostermann J (2010) Geologie der Niederrheinischen Bucht. Bergschadensforum 15. März 2010, Niederziehr, Tagesband (Hrsg. RWE Power), S. 6-11 http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/501410/data/60060/1/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/Tagungsband-des-Bergschadensforum-vom-15.03.2010.pdf

Knufinke H und Kothen H (1997) Die Tektonik der Niederrheinischen Bucht vor, während und nach der Hauptflözbildung. Int. J. Braunkohle Surface Mining, Vol. 49, No.5, 473-479

Kosma M (2012) 3. Rahmenbetriebsplan für den Tagebau Hambach 2020-30. Planungsausschuss der Gemeinde Niederzier, 26. Januar 2012 http://www.niederzier.de/gemeinde/downloads/120126_PA_Niederzier_002.pdf

Kothen H (1997) The Origin of Brown Coal in the Changing Lower Rhine Basin – A Survey. Int. J. Braunkohle Surface Mining, Vol. 49, No.1, 57-66

Kothen H und Knufinke H (1990) Restsetzungen auf Neulandflächen. Braunkohle 10/1990, 24-29.

Kratzsch H (1997) Bergschadenkunde. 3. Auflage, Bochum

Kuyumcu M (2012) Besondere Herausforderungen der Braunkohlesanierung der LMBV. LMBV, 10 S.

Landesgrundwasserdienst NRW (1954) Grundwasserstände unter Flur, Stand November 1953. Landesgrundwasserdienst, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen. Hergestellt vom Landesvermessungsamt NRW. Vergriffen.

Landesumweltamt Brandenburg (1995) Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen. Studien und Tagungsberichte, Band 6. ISSN 0948-0838

LANUV (2007) Tagebaue des Rheinischen Braunkohlereviers http://www.lanuv.nrw.de/wasser/braunkohle/braunkomap.htm

LANUV (2007a) Grundwassermodelle des LANUV zum Einsatz in der Braunkohleplanung http://www.lanuv.nrw.de/wasser/braunkohle/braunkogwm.htm

Lenk S und Wisotzky F (2008) Bewertung von Minderungsmaßnahmen zur Grundwasserversauerung im rheinischen Tagebau Garzweiler. Vom Wasser 106, 16-22

Lenk S und Wisotzky F (2007) Chemische Beschaffenheit und modellierte Genese von Grundwässern in Braunkohlenabraumkippen des Tagebaus Inden. Grundwasser 12, 301-313

Leuchs W (2013) Grundwasserwiederanstieg im Rheinischen Revier. Wasserwirtschaft im Rheinischen Braunkohlenrevier, Fachtagung, 27.06.2013, Inden/Altdorf

Levacher D (2009) Braunkohlentagebau Garzweiler II – Monitoring für die Umwelt. Wasser und Abfall, 9, 31-35

Lüttecke K und Schwerger R (1999) Markscheiderische Aufgaben bei der Indeverlegung. Braunkohle, 51, 182-196.

Mönchengladbach (2010) Zweiter Braunkohlenbericht. Zusammenschau 2005 – 2010, Fortschreibung 2009 / 2010. Dipl.-Geogr. Barbara Weinthal, Dipl.-Geol. Olaf Holtrup. Stadt Mönchengladbach.
http://www.npsn.de/download/1/ZweiterBraunkohlenbericht2005bis2010.pdf

Mulenga D (2002) Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar.
http://www.dissertation.de/FDP/3898254690.pdf

Nickel E (2003) Oligozäne Beckendynamik und Sequenzstratigraphie am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens. Dissertation, Universität zu Köln
http://hss.ulb.uni-bonn.de/2003/0303/0303.pdf

Niemann-Delius C, Vossen P, Hennig A (2011) Studie Gewinnung und Vermarktung von Kies und Sandvorkommen aus Tagebauen des Rheinischen Reviers - Gebündelte Gewinnung. Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik. Im Auftrag von RWE Power AG. Aachen, den 05. September 2011
http://www.brd.nrw.de/regionalrat/sitzungen/2012/Studie_RWTH_Gebuendelte-Gewinnung.pdf

NN (1997) 12. Sedimentologentreffen. Exkursionsführer. 21.-24. Mai 1997 am Geologischen Institut der Universität zu Köln. – Terra Nostra 1997/3 186 S.
http://www.academia.edu/2117346/Befahrung_des_Tagebaues_Garzweiler_der_RWE

NN (1987) Exkursion II: Rheinisches Braunkohlenrevier. 6. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie vom 9. Bis 12. Juni 1987 in Aachen, S. 37-58

NRW (2013) Bergschäden durch den Braunkohlebergbau. Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage 2 der Fraktion Bündnis 90 / Die Grünen. Drucksache 16/3340.
http://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD16-3340.pdf

NRW (2010) Konsequenzen aus der Katastrophe von Nachterstedt für die Rheinischen Braunkohletagebaue. Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage 39 der Fraktion Bündnis 90 / Die Grünen. Drucksache 14/10504.
http://www.bund-nrw.de/fileadmin/bundgruppen/bcmslvnrw/PDF_Dateien/Themen_und_Projekte/Braunkohle/Antwort_Gr._Anfrage_11.01.2010.pdf

Oswald T (2005) Neue geohydrologische Erkenntnisse aus dem Umfeld des Braunkohle-Tagebaus Hambach (Niederrheinische Bucht, Deutschland). Scriptum 13, 91-120, Krefeld

Oswald T (2007) Hydrogeologie der tiefen Liegendleiter im Rheinischen Revier. Bochumer Grundwassertag 2007, 26-36

Paas W, Schalich J (2005) Böden am Niederrhein. Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb.

Petri R und Stein W (2012) Tagebauböschungen – Standsicherheit von Böschungen der Braunkohlentagebaue in Nordrhein-Westfalen. World of Mining, 64(2), 114-125
http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/b/braunkohlegewinnung/fachartikel_tagebauboesch.pdf

Poths M (2014) Transparenz- und Akzeptanzsteigerung in der Bergschadensbearbeitung. Bergschadensforum am 12.03.2014
http://www.wittundpartner.de/uploads/tx_t3statusbar/RWE_12-03-14_alle-Vortraege.pdf

Preuße A, Schulte R (2012) Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. RWE Bergschadensforum 2012.
https://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/2385706/data/2374338/2/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/downloads/Tagungsband-des-Bergschadensforums-vom-09.03.2012.pdf

Rathsmann W (1986) Bodenbewegung als Folge von Gundwassersenkung im rheinischen Braunkohlenrevier. Braunkohle 38(4), 82-86.

Rosner P (2011) Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge. Dissertation RWTH Aachen, 318 S.

Rosner P, Heitfeld M, Spreckels V, Vosen P (2014) Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier.
http://www.vosen.de/pdf/Bodenhebungen_IHS_RAG_Ruhrgeotag_2014.pdf

RWE (2014) Standorte
http://www.rwe.com/web/cms/de/59998/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/garzweiler/

RWE (2011) 3. Rahmenbetriebsplan für die Fortführung des Tagebaus Hambach von 2020 bis 2030.

Schaefer W (2004) Bodenbewegungen infolge Sümpfung des rheinischen Braunkohlebergbaus. In: H. Kratzsch, Bergschadenkunde, 4. Auflage: Anhang 25, 874-880.

Schaefer W (2006) Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier – Beobachtungen nach Wiederanstieg des Grundwassers. 7. Geokinematischer Tag, Tagungsband, Freiberg.

Schaefer W. (1999) Bodenbewegungen und Bergschadensregulierung im Rheinischen Braunkohlenrevier. 42. DMV-Tagung Cottbus, Tagungsband, S. 150-159.

Schneider H und Thiele S (1965) Geohydrologie des Erftgebietes. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes NRW (Hrsg.)

Schüler D (2002) Ein stochastischer Ansatz zur Setzungsprognose von Tagebaukippenböden. Diplomarbeit , Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau

Schulz W (2007) Die Kolluvien der westlichen Kölner Bucht. Gliederung, Entstehungszeit und geomorphologische Bedeutung. Dissertation, Universität zu Köln
http://kups.ub.uni-koeln.de/1965/1/DissSchulzKolluvien.pdf

Seyfried H und Leinfelder R (2007) Meeresspiegelschwankungen - Ursachen, Folgen, Wechselwirkungen.
http://userpage.fu-berlin.de/leinfelder/palaeo_de/edu/Msp/Msp_pop1.html#Inhalt

Simon S (2012) Möglichkeiten und Grenzen von Grundwassermodellen sowie deren Einsatz im Rheinischen Braunkohlenrevier. Vortrag, 23.03.2012, Anrufungsstelle Bergschaden Braunkohle NRW
http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/bergschaden/fachinformationen_grundwassermodelle.pdf

Starke R (1990) Wiedernutzbarmachung im Rheinischen Braunkohlenrevier. Braunkohle 10/1990, 4-10

Teichmüller M (1991) Rekonstruktionen verschiedener Moortypen des Hauptflözes der niederrheinischen Braunkohle, Geologische Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.

Thiede H (1991) Das langfristige abbautechnische und wasserwirtschaftliche Planungskonzept für den Tagebau Garzweiler im Rheinischen Braunkohlenrevier. Neue Bergbautechnik 20, 27-36.

Tutthas und Meyer Ingenieurbüro (2014) Variantenstudie zum langfristigen Ausgleich der Verlustwassermenge des Blaustein-Sees. Erläuterungsbericht Juni 2014 | 1. Ausfertigung Projektnummer 0216 035.

Van Krevelen D (1993) Coal: Typology – Chemistry – Physics – Constitution. Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo

Walther A (2002) Die Braunkohlelagerstätten Deutschlands: Genese, Stratigraphie und wichtige Rohstoffeigenschaften. Oberseminar, TU Freiberg.
http://www.geo.tu-freiberg.de/oberseminar/os02_03/Bk_Lagerstl.pdf

Wegner M (2014) Modell der aktiven Verwerfungen in der Niederrheinischen Bucht.
http://www.mwegner.de/geo/erdbeben-koelner-bucht/modell-der-aktiven-verwerfungen.html#!img[pp_gal]/0/

Weinthal B, Holtrup O (2009) Braunkohlenbericht, Fortschreibung 2008 / 2009

Westerhoff W, Kemna H, Boenigk W (2008) The confluence area of Rhine, Meuse, and Belgian rivers: Late Pliocene and Early Pleistocene fluvial history of the northern Lower Rhine Embayment. Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw, 87(1), 107 – 125
http://www.researchgate.net/profile/Wim_Westerhoff/publication/47351758_The_confluence_area_of_Rhine_Meuse_and_Belgian_rivers_Late_Pliocene_and_Early_Pleistocene_fluvial_history_of_the_northern_Lower_Rhine_Embayment/links/004635268f8125c70b000000.pdf

Wikipedia (2015) Koyna-Talsperre. (Seite zuletzt am 22. Januar 2015 um 12:23 Uhr geändert.)
https://de.wikipedia.org/wiki/Koyna-Talsperre

Wikipedia (2014) Rheinisches Braunkohlenrevier. (Seite zuletzt am 10. November 2014 um 21:41 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Rheinisches_Braunkohlerevier

Wikipedia (2014b) Geologie der Niederrheinischen Bucht. (Seite zuletzt am 12. November 2014 um 22:19 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Geologie_der_Niederrheinischen_Bucht

Wikipedia (2014c) Tagebau Inden. (Seite zuletzt am 11. Dezember 2014 um 21:23 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Inden

Wikipedia (2014d) Tagebau Hambach. (Seite zuletzt am 27. November 2014 um 13:59 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Hambach

Wikipedia (2014e) Tagebau Garzweiler. (Seite zuletzt am 14. Oktober 2014 um 20:57 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Garzweiler

Wikipedia (2014f) Liste der Hochkippen im Rheinischen Braunkohlerevier. (Seite zuletzt am 17. Juli 2014 um 14:22 Uhr geändert)
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Hochkippen_im_Rheinischen_Braunkohlerevier

Yoo Y (2008) Computergestützte Auswertung, Modellierung und Visualisierung der Quartären Mittelterrassen und Niederterrassen in der südlichen Niederrheinischen Bucht durch Programmierung von Arcview. Dissertation, Universität zu Köln
http://kups.ub.uni-koeln.de/2315/3/Diss_yoo.pdf

Ziegler P und Dèzes P (2005) Neogene uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. Variscan Massifs 30.11.2005.
https://comp1.geol.unibas.ch/downloads/Variscan_Massifs.pdf

Ziegler M (2010) Bodenbewegungen infolge Grundwasserabsenkung bzw. Wiederanstieg. Bergschadensforum 15. März 2010, Niederziehr, Tagesband (Hrsg. RWE Power), S. 15-25. http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/501410/data/60060/1/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/bergschaeden/Tagungsband-des-Bergschadensforum-vom-15.03.2010.pdf

Ziegler M, Giese S, Forkel C, Schaefer W (2009) Prognose von Bodenbewegungen infolge Sümpfungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlerevier. Braunkohle 10/2009, 439-443
Ziegler M, Giese S, Schaefer W, Forkel C (2007) Prognose sümpfungsbedingter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. Geotechnik 30(1), 48-54

Zimmermann E (2010) Trocknung von Braunkohlen mittels hochfrequenter-elektromagnetischer Strahlung unter besonderer Berücksichtigung der Braunkohlen des rheinischen Reviers. Dissertation, RWTH Aachen
http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2010/3320/