

Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande - Bestandsaufnahme und Prognosen -

**Michael Heitfeld²⁾, Frank Denys¹⁾, Marije Schouwstra¹⁾
Johannes Klünker²⁾, Peter Rosner²⁾, Jaap Spaans³⁾**

1) Ministerie van Economische Zaken / Den Haag, Niederlande,

2) Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH / Aachen, Deutschland

3) Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. / Deventer, Niederlande

ZUSAMMENFASSUNG:

Das niederländische Wirtschaftsministerium hat 2014 eine umfassende Studie über alle zukünftig noch sicherheitlich relevanten Themenbereiche des Nachbergbaus für das Südlimburger Steinkohlenrevier beauftragt. Der Bergbau wurde hier bis 1974 stillgelegt; der Grubenwasseranstieg ist aber aufgrund der hydraulischen Verbindungen zu dem erst in 1992 stillgelegten Aachener Steinkohlenrevier noch nicht abgeschlossen. Der Auftrag wurde an ein deutsch/niederländisches Projektteam vergeben, das sowohl detaillierte Kenntnisse der regionalen Hydrogeologie besitzt als auch eine Bearbeitung von Fragestellungen im Zusammenhang mit Risiken durch bergbauliche Hinterlassenschaften auf dem aktuellen Stand der Technik und nach neuesten Forschungsergebnissen gewährleisten konnte. Auf der Grundlage einer umfassenden Bestandsaufnahme sowie einem regionalen Grundwassermodell wurden eine Risikobewertung vorgenommen und Konzepte für Maßnahmen und ein Monitoring erarbeitet. Die Studie wurde Ende 2016 veröffentlicht; der vorliegende Beitrag liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen.

ABSTRACT:

The Ministerie van Economische Zaken (EZ) of the Netherlands in 2014 initiated the project „Na-ijlende gevolgen steenkolenwinning Zuid-Limburg“ and commissioned a comprising study considering all future safety aspects with respect to the potential consequences of the former hard coal exploitation in South Limburg. The coal mines were abandoned until 1974; due to hydraulic connections to the Aachen mining district, that was abandoned in 1992, the rise of the mine water has not finished yet. The study was assigned to a German-Dutch project group with comprising references of the regional Hydrogeology as well as excellent expertise in all questions regarding risks from mining relicts. Based on a comprising inventory and a regional groundwater model a risk assessment was carried out and a concept for measures and monitoring elaborated. The study was published in 2016; the paper in hand provides a summary of the results and recommendations.

1 Einleitung

Im niederländischen Südlimburg wurde zwischen dem Grenzgebiet zu Deutschland bei Kerkrade/Herzogenrath im Südosten und der belgischen Grenze an der Maas bei Geleen im Nordwesten auf einer Fläche von rd. 230 km² bis 1974 Steinkohle abgebaut. Die oberkarbonische Steinkohle des Südlimburger Reviers bildete vor der Exploration der Erdgas- und Erdölfelder im Norden der Niederlande die wesentliche Grundlage der Energieversorgung der Niederlande.

Die Anfänge dieses niederländischen Steinkohlenbergbaus lagen bereits im 12. Jahrhundert, als in der Nähe des Wurmals bei Herzogenrath Schürfungen auf der tagesnah anstehenden Steinkohle begannen. Mit der Industrialisierung wanderte der Bergbau nach Nordwesten bis an die Maas, wo die Steinkohle in größeren Tiefen unter mächtigem Deckgebirge lagert. Aufgrund der Erdgasfunde in Groningen begannen Ende der 1960er Jahre im Südlimburger Revier die Zechenschließungen. 1974 wurde mit der Grube Julia bei Eyselshoven das letzte Bergwerk geschlossen. Seitdem ist das Erbe des Bergbaus mehr und mehr aus dem Bewusstsein der Öffentlichkeit verschwunden.

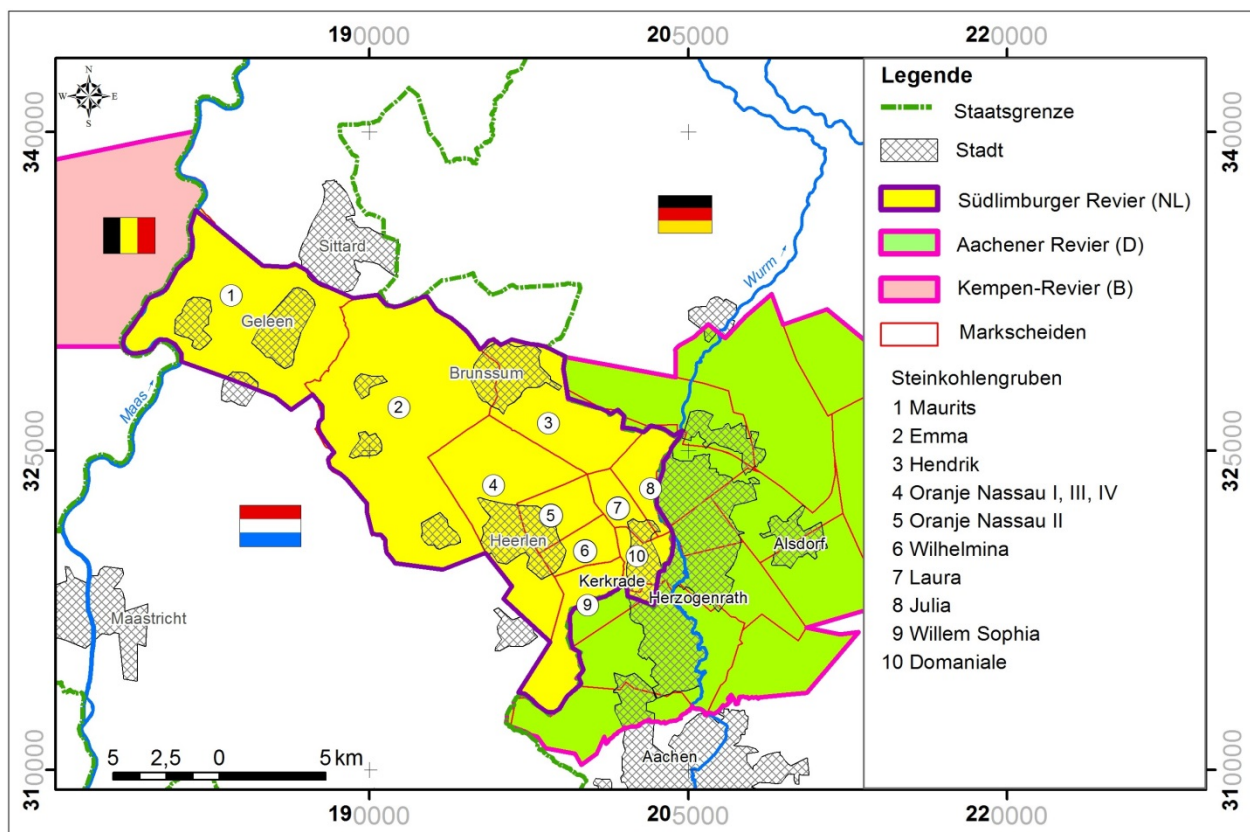


Abb. 1: Übersichtslageplan Südlimburger Steinkohlenrevier

Nach 1974 wurde die Wasserhaltung auf niederländischem Staatsgebiet zum Schutz der aktiven deutschen Gruben durch die EBV GmbH bis 1994 weiter betrieben, so dass zunächst nur ein Teilanstieg des Grubenwassers in den niederländischen Gruben erfolgte. Nach Schließung des letzten Bergwerks auf deutscher Seite - Emil Mayrisch - stellte die EBV GmbH dann 1994 die Wasserhaltung endgültig ein. Seitdem steigt das Grubenwasser auch im gesamten Südlimburger Revier wieder an. Der Abschlussbetriebsplan der EBV GmbH sieht für das Aachener Revier den Anstieg des Grubenwassers bis in das natürliche Vorflutniveau - ohne Pumpmaßnahmen - vor.

Eine zunehmende Zahl von Schadensmeldungen an Gebäuden im ehemaligen Südlimburger Steinkohlenrevier und die Nachrichten über Gebäudeschäden infolge des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Revier bei Wassenberg/Deutschland haben die niederländischen Behörden erneut für das Thema Grubenwasseranstieg sensibilisiert. Als im Herbst des Jahres 2011 im Stadtgebiet von Heerlen ein Einkaufszentrum aufgrund eines Tagesbruches teilweise abgerissen werden musste, begann in den Niederlanden eine systematische Auseinandersetzung mit den möglichen Spätfolgen des Bergbaus.

Das niederländische Wirtschaftsministerium (EZ) hat schließlich in 2014 unter fachlicher Federführung der niederländischen Bergbehörde (SodM) eine systematische Erfassung und Aufarbeitung der zukünftig noch zu erwartenden Spätfolgen der ehemaligen Steinkohlengewinnung im Südlimburger Revier in Auftrag gegeben. Der Arbeitsauftrag lautete: „*Wie können Einwirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus in Südlimburg in den nächsten 40 Jahren gemindert bzw. beherrscht werden*“.

Der Auftrag wurde auf der Grundlage einer europaweiten Ausschreibung an eine deutsch/niederländische Projektgruppe (Projectgroup Na-ijlende gevolgen van de steenkolenwinning in Zuid-Limburg - „projectgroup GS-ZL“) unter Federführung des Ingenieurbüros Heitfeld-Schetelig, Aachen (IHS), vergeben. Für die Bewertung der Einwirkungen des Grubenwasseranstiegs und der Hinterlassenschaften des Altbergbaus sollten Maßstäbe angelegt werden, wie sie in Nordrhein-Westfalen angewendet werden. Der Abschlussbericht des Projektteams wurde im Dezember 2016 veröffentlicht (Projectgroup GS-ZL, 2016). Die vorliegende Veröffentlichung gibt eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse.

2 Projektteam und Projektstruktur

Der Arbeitsauftrag und die zu bearbeitenden Themenbereiche zur Erfassung der möglichen Nachwirkungen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg wurden durch die niederländische Bergbehörde (Staatstoezicht op de Mijnen) erarbeitet. Die Projektstruktur wurde nach den Themenbereichen des Arbeitsauftrages entwickelt (Abb. 2). Die beteiligten Fachstellen waren dabei:

- IHS, Aachen (D)
- WITTEVEEN & BOS, Deventer (NL)
mit Dr. Pieter van Roijen und Bernard Dost (KNMI)
- TU Delft, Geoscience & Remote Sensing, Prof. Ramon Hanssen (NL)
- GeoControl, Maastricht (NL), Dr. Roland Bekendam
- DMT, Essen (D)
- ahu, Aachen (D)



Projektsprache war Englisch; eine Zusammenfassung des Abschlussberichtes wurde in Niederländisch vorgelegt. Die einzelnen Arbeitsgruppen haben bis Oktober 2015 ihre Untersuchungsergebnisse in Zwischenberichten zusammengefasst. Darin wurden die Methodik und das jeweils untersuchte System (z.B. Boden, Grundwasser, Bergbau) beschrieben, potenzielle Einwirkungsbereiche auf Schutzgüter ausgewiesen und darüber hinaus Monitoring- und Maßnahmenkonzepte vorgelegt.

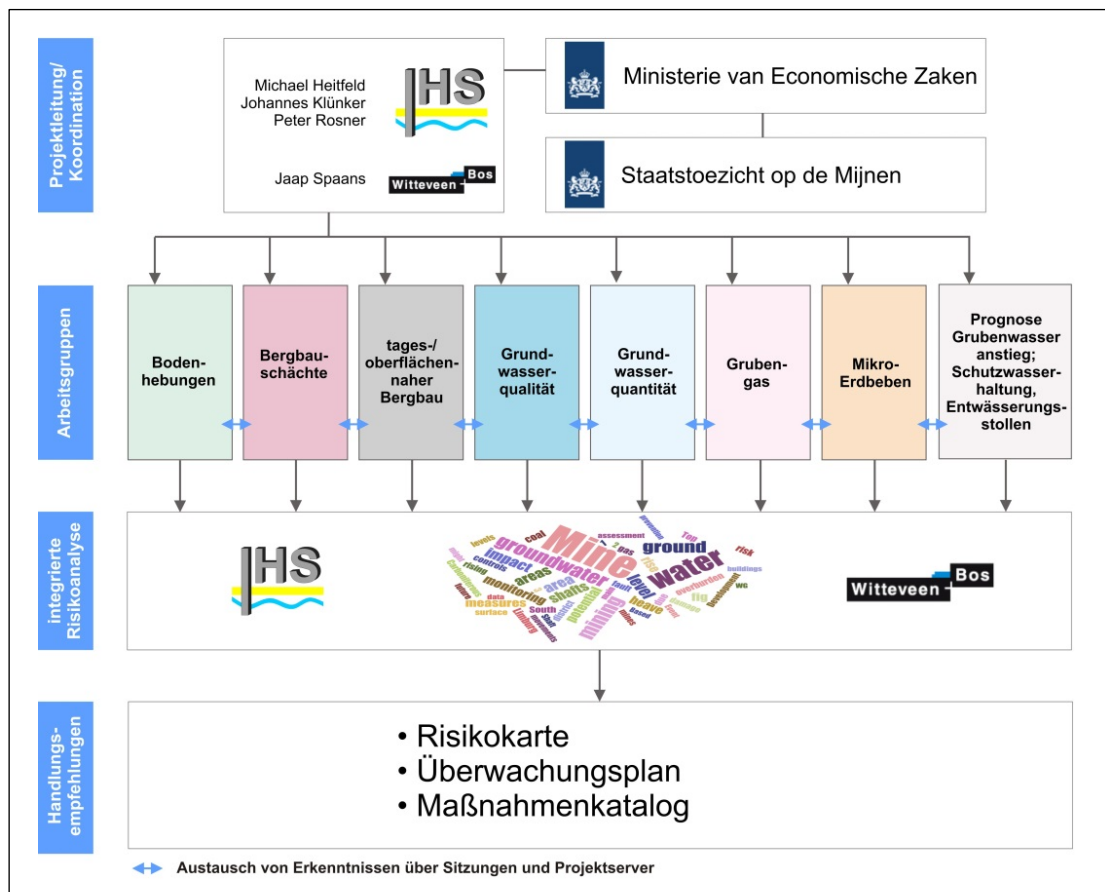


Abb. 2: Projektstruktur und schematischer Ablaufplan

Die Zwischenberichte wurden einem internen Review-Prozess unterworfen. Für komplexere Themenbereiche wurden externe Fachgutachter im Sinne eines Review-Prozesses eingeschaltet:

- Prof. Melchers, Prof. Goerke-Mallet, Dr. Mütterthies (TH Georg Agricola) zur Thematik „Bodenhebungen“
- Dr. Fritschen, DMT, zur Thematik „Mikroerdbeben“

Parallel dazu wurden Ende November 2015 die Zwischenergebnisse im Rahmen eines Workshops den betroffenen Kommunen und Körperschaften vorgestellt und dort diskutiert („Technische Plattform“). Die Hinweise und Anregungen aus den Review-Prozessen und der Technischen Plattform wurden in die Berichte eingearbeitet. Auf der Grundlage der Berichte der einzelnen Arbeitsgruppen wurde dann eine umfassende Risikoanalyse durchgeführt („Bow-Tie-Analyse“). Im Ergebnis wurden Risikokarten und ein umfassendes Monitoring- und Maßnahmenkonzept vorgelegt.

3 Geologie und Bergbau im Projektgebiet

Das Südlimburger Steinkohlenrevier liegt im südöstlichen Teil der Niederlande in der Provinz Limburg. Es grenzt im Osten unmittelbar an das deutsche Aachener Steinkohlenrevier und im Westen an das belgische Kempens-Mijngebiet. Alle drei Steinkohlenreviere sind Teil eines zusammenhängenden, subvariszischen Kohlegürtels im Norden der Eifel und des Brabanter Massivs. Aus dem deutsch-niederländischen Grenzbereich bei Kerkrade/Herzogenrath erstreckt sich das ehemalige

niederländische Abbaugbiet über eine Strecke von rd. 30 km nach Nordwesten bis an die Maas; in SW-NE-Richtung weist das Revier eine mittlere Erstreckung von rd. 12 km auf (Abb. 3). Die Städte Heerlen, Brunssum und Geleen liegen im Zentrum dieses Gebietes (vgl. Abb. 1).

Im südöstlichen Grenzgebiet zu Deutschland, in der Gemeinde Kerkrade, tritt das eng gefaltete Steinkohlengebirge unter gering mächtigem Deckgebirge auf. Hier wurde schon im 12. Jahrhundert Steinkohle abgebaut. Der historische Altbergbau erstreckt sich über eine Fläche von rd. 2 km² in der dicht besiedelten Ortslage von Kerkrade. Nach Nordwesten sinkt das Steinkohlengebirge unter immer mächtiger werdendes Deckgebirge ab; gleichzeitig nimmt die Faltungsintensität schnell ab. An der Maas erreicht das Deckgebirge eine Mächtigkeit um rd. 400 m. Außerhalb des historischen Altbergbaubereichs begann der Tiefbergbau zumeist erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts.

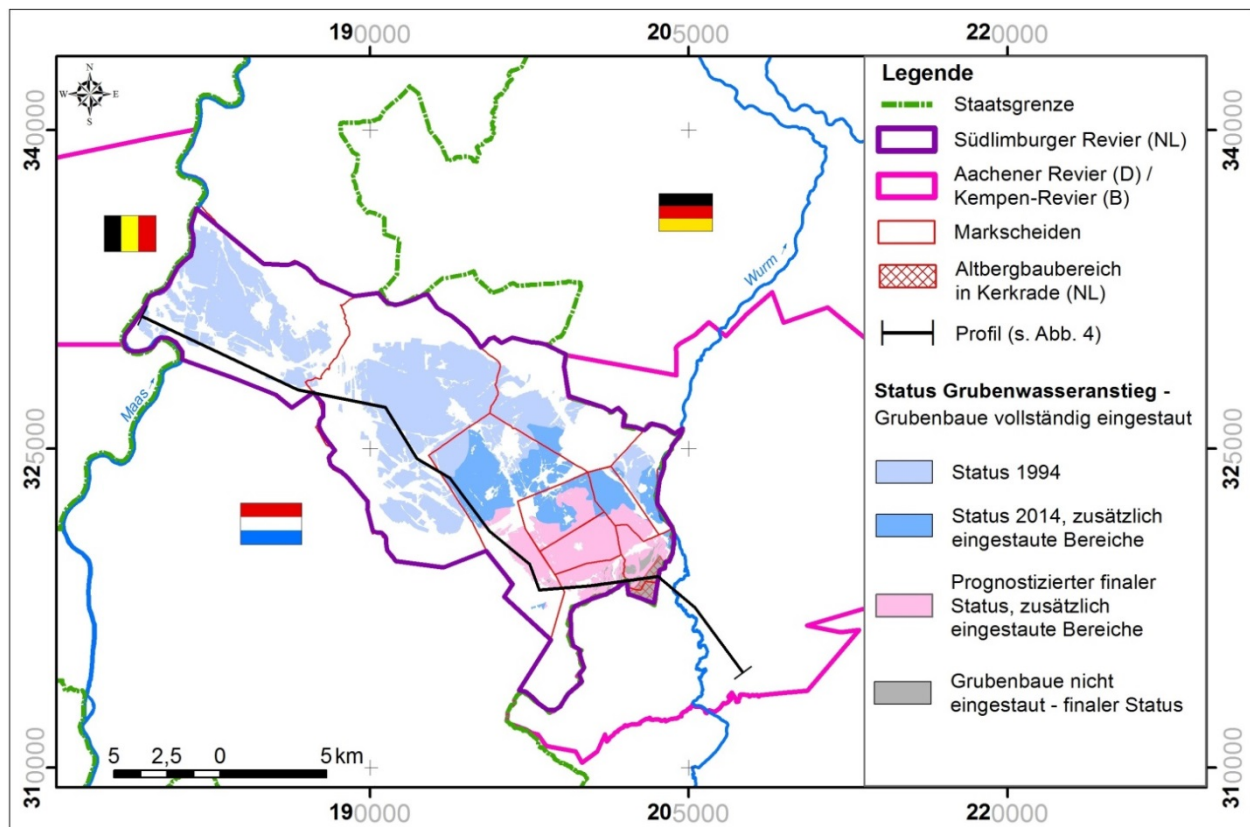


Abb. 3: Abbaubereiche des Soudlimburger Steinkohlenreviers mit Einstausituation

Das Soudlimburger Revier liegt im Übergangsbereich zwischen der Limburger Tafel und der Niederrheinischen Bucht. Das Grundgebirge sinkt hier an zwei NW-SE-verlaufenden tektonischen Hauptstörungen - Heerlerheider Sprung und Feldbiß - sukzessive zur Niederrheinischen Bucht ab. Im südwestlichen Teil des Reviers ist das Deckgebirge durch kretazische Sand/Schluff und Kalksteinablagerungen charakterisiert; im nordöstlichen Teil dominieren tertiäre Lockergesteine.

Die Abbaubereiche der Steinkohlengruben erstrecken sich flächenhaft über das gesamte Revier. In Abhängigkeit von der Lagerstättenstruktur wurden Abbauteufen bis zu rd. -800 mNAP erreicht. Die aufsummierten gebauten Flözmächtigkeiten erreichten in den Abbauschwerpunkten Beträge um 15 m. Dementsprechend traten abbaubedingte Bodensenkungen mit Beträgen um 10 bis 15 m auf. Im Soudlimburger Revier waren aber aufgrund der morphologischen Gegebenheiten keine aktiven oberflächennahen Entwässerungsmaßnahmen in Bergsenkungsbereichen erforderlich.

Die Gruben des Südlimburger Reviers waren in der Betriebsphase durchgängig miteinander verbunden. Die Wasserzuläufe zu den Betrieben waren lokal sehr unterschiedlich; es traten aber vielfach starke Wasserzutritte aus dem Deckgebirge auf. Die Druckhöhen in den basalen Deckgebirgsaquiferen wurden entsprechend abgesenkt, lokal wurden basale Grundwasserhorizonte entleert.

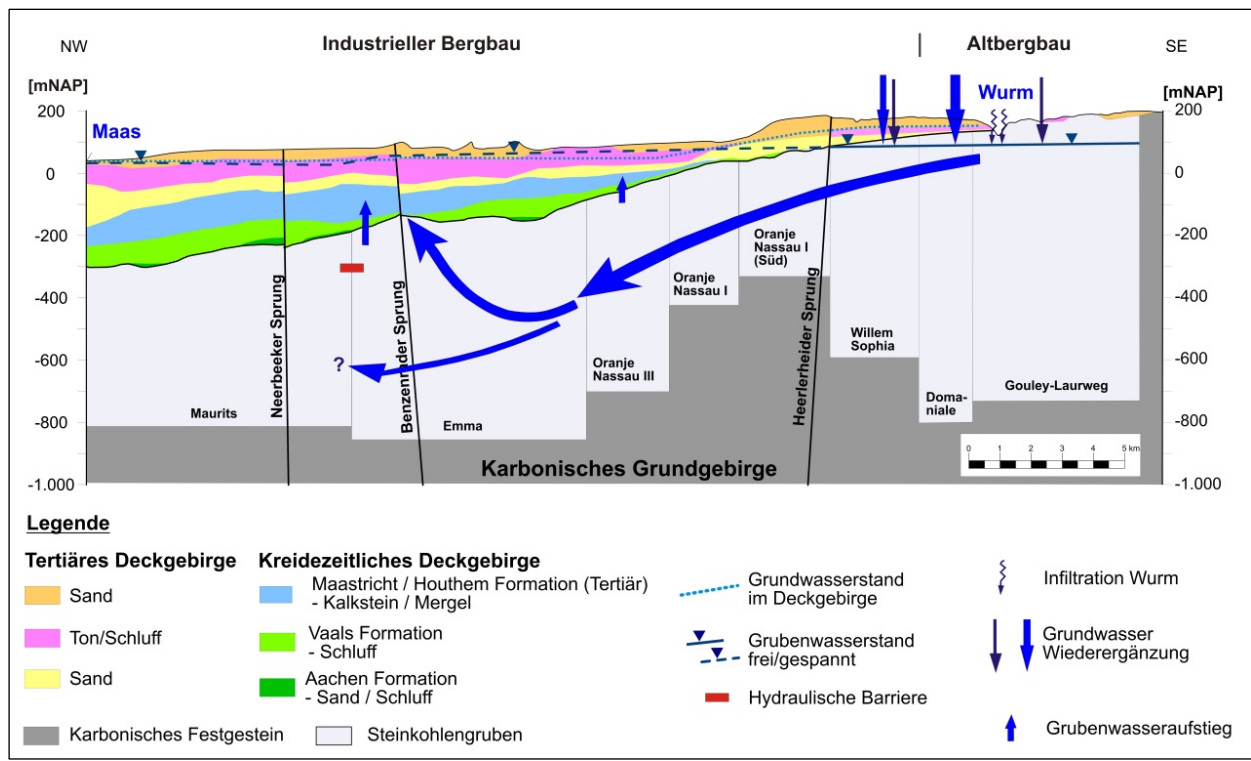


Abb. 4: Geologisch-hydrogeologischer Profilschnitt durch das Südlimburger Revier (schematisch)

Die Gesamtwasserhaltungsmenge betrug in der letzten Betriebsphase rd. 48 m³/min für das gesamte niederländische Revier. Die Grubenwässer waren in der Regel vergleichsweise gering mineralisiert. Die in den Wasserhaltungen gehobenen Wässer wiesen im Wesentlichen Chlorid-Gehalte zwischen rd. 100 und 3.000 mg/l auf (vgl. ROSNER, 2011).

4 Stilllegung und Grubenwasseranstieg

Im Zuge der sukzessiven Schließung der einzelnen Gruben zwischen 1967 und 1974 wurden die noch betriebenen Gruben durch Wasserdämme gegen Wasserzuläufe aus den Stilllegungsbereichen geschützt. So fanden in den 1960er und 1970er Jahren bereits erste Teilanstiege in den einzelnen Stilllegungsbereichen statt (Abb. 5). Nachdem zuletzt die Grube Julia 1974 stillgelegt wurde, übernahm die EBV GmbH ab 1974 zum Schutz der eigenen Bergwerke auf deutschem Gebiet die Wasserhaltung im niederländischen Feld Domaniale. Aufgrund der weiträumigen hydraulischen Verbindungen wurde dadurch praktisch das gesamte Südlimburger Revier weiter gesümpft. In dieser Zeit stellte sich ein hydraulisches Gleichgewicht im Niveau der jeweiligen Verbindungsstrecken zwischen den einzelnen Gruben ein. Im nordwestlichen und zentralen Teil des Reviers wurden die Gruben dabei bereits vollständig eingestaut; der Druckspiegel stieg hier bis in das Deckgebirgsniveau an.

Nachdem im Zuge der Schließung der Gruben des Aachener Reviers 1994 auch die Wasserhaltung im niederländischen Grubenfeld Domaniale durch die EBV GmbH eingestellt wurde, stellte sich das Standwasserniveau in allen niederländischen Gruben auf einem weitgehend einheitlichen Niveau ein. Bis 2016 stieg das Standwasser auf ein Niveau zwischen 20 und 44 mNHN an. Die mittlere Anstiegsgeschwindigkeit beträgt derzeit rd. 2 bis 3 m/a. Damit sind die Grubenbaue bereits weitläufig, bis auf einen kleinen Bereich im Südosten vollständig eingestaut; der Druckspiegel ist bis in das Deckgebirgsniveau angestiegen (Abb. 4).

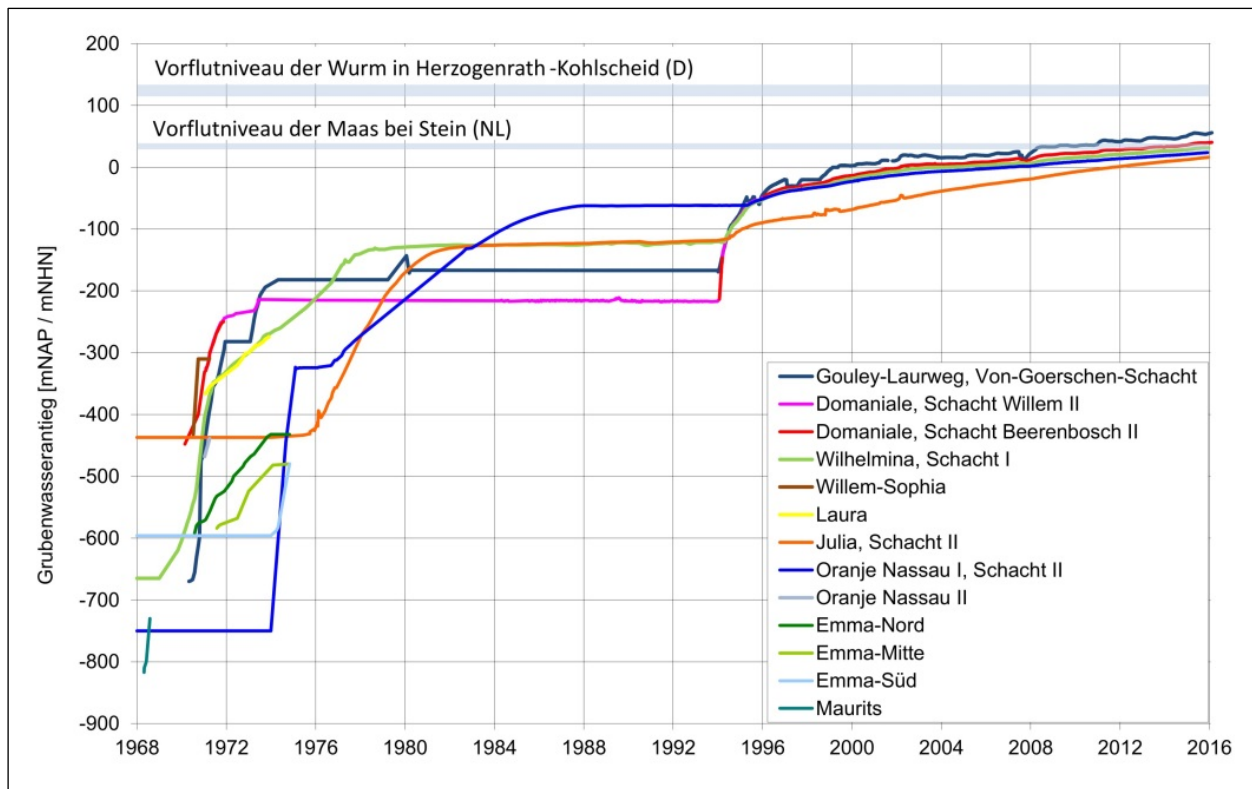


Abb. 5: Grubenwasseranstieg im Südlimburger Revier

Auf der Grundlage einer Grundwassermodellierung wird für den weiteren Grubenwasseranstieg ein Anstieg um weitere 40 m auf ein Endniveau von maximal rd. 80 mNHN in Kerkrade erwartet. Das würde bedeuten, dass das tiefste Vorflutniveau der Wurm im Altbergbaubereich um das Wurmatal bei Kerkrade und Herzogenrath auf deutscher Seite (rd. 110 mNHN) nicht erreicht würde. Das insbesondere über das Wurmatal zutretende Niederschlagswasser würde auf diesem Niveau über die niederländischen Gruben und schließlich dort auch über das Deckgebirge nach Nordwesten abströmen (s. Abb. 4). Es wird erwartet, dass sich der weitere Grubenwasseranstieg noch über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren hinziehen wird.

5 Einwirkungen infolge des Grubenwasseranstiegs

5.1 Bodenhebungen

Zur Erfassung der im Rahmen des Grubenwasseranstiegs seit den 1960er Jahren erfolgten Bodenbewegungen wurden durch die TU Delft die verfügbaren Leitnivelementdaten sowie Satellitenda-

ten (InSAR) für das Projektgebiet und die angrenzenden Bereiche von Belgien und Deutschland zusammengestellt und ausgewertet. Leitnivellements wurden im Südlimburger Raum mit sehr wechselhaften Messintervallen im Wesentlichen seit Anfang der 1970er Jahre bis 2012 durchgeführt. Satellitendaten stehen flächenhaft für die Zeiträume 1992-2000 (ERS-1/2), 2003-2010 (ENVISAT) und 2010-2014 (RadarSAT-2) zur Verfügung. Weiterhin wurden für den östlichen Teil des Projektgebietes hochauflösende TerraSAR-X- Daten aus dem Zeitraum 2013-2015 ausgewertet.

Aus Leitnivellementdaten und InSAR-Daten wurde ein einheitlicher Datenpool generiert, der die Erarbeitung von Zeitreihen charakteristischer Messpunkte, Profildarstellungen und Isohypsenpläne für ausgewählte Zeiträume ermöglichte. Anhand der Zeitreihenanalysen lässt sich u.a. sehr gut die Korrelation zwischen dem Verlauf des Grubenwasseranstiegs und der Entwicklung der Bodenhebungen zeigen. Einen Überblick für die im Rahmen des Grubenwasseranstiegs zwischen 1974 und 2014 insgesamt erfassten Bodenbewegungen liefert Abb. 6.

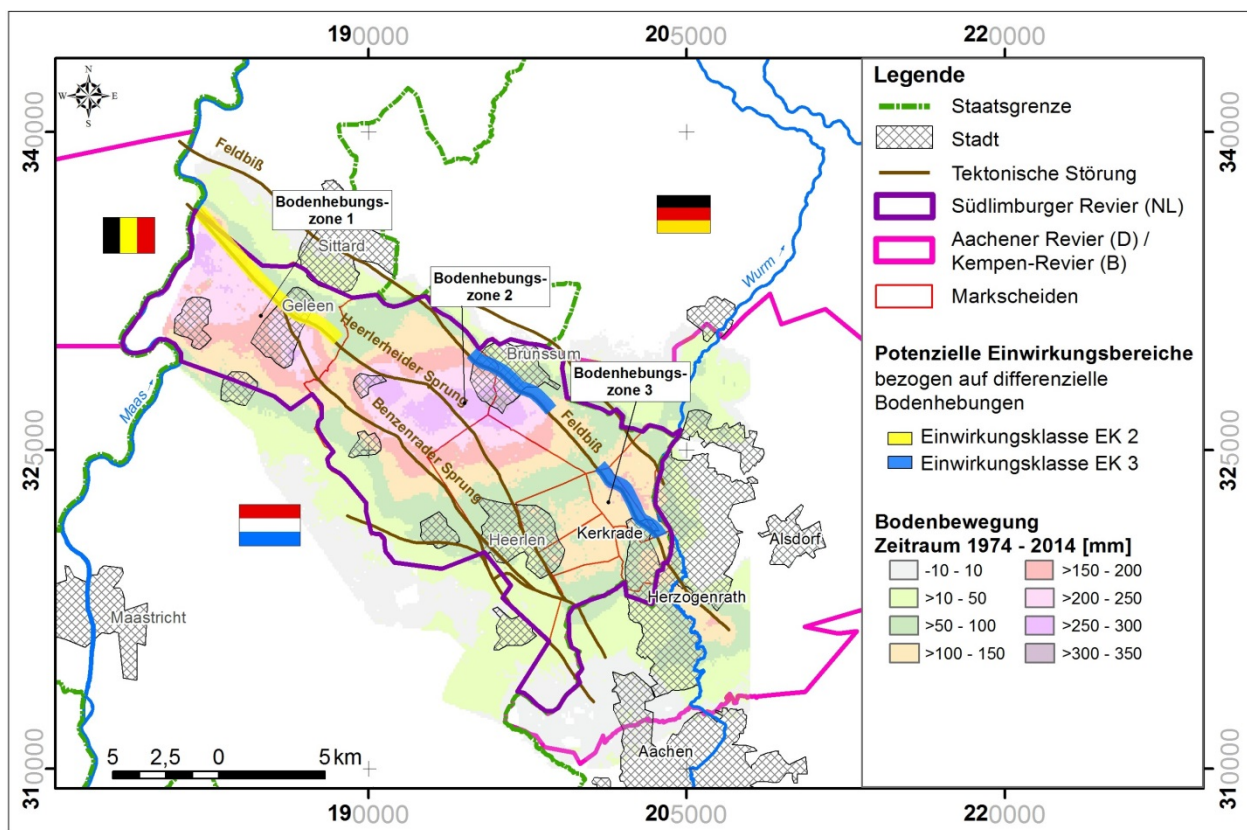


Abb. 6: Bodenbewegungen im Südlimburger Steinkohlenrevier, Periode 1974 bis 2014, und potenzielle Einwirkungsbereiche ungleichmäßiger Bodenhebungen

Im Zuge des Grubenwasseranstiegs erfolgten die Hebungen relativ gleichmäßig und weiträumig. Es haben sich drei Hebungsschwerpunkte im Bereich der ehemaligen Abbauswerpunkte herausgebildet. Die stärksten Hebungen treten im zentralen und nordwestlichen Teil des Reviers auf (Hebungszonen 1 und 2), wo die Gruben überwiegend schon vor 1994 vollständig vollgelaufen waren und der Druckspiegel am weitesten in das Deckgebirge angestiegen ist. Hier wurden maximale Hebungsbeträge um 0,30 bis 0,35 m ermittelt. Im südöstlichen Teil des Reviers, wo das Standwasserniveau die Karbonoberfläche noch nicht erreicht hat, sind die Hebungen bisher deutlich geringer (maximal rd. 0,10 bis 0,15 m, Hebungszone 3). Die Hebungen sind im Wesentlichen auf die Grenzen des Steinkohlenreviers begrenzt und klingen über die Abbauränder hinweg sukzessive aus.

Das Nachvollziehen der bisher erfolgten Bodenbewegungen war von grundsätzlicher Bedeutung für die Identifikation möglicher Risikozonen mit ungleichmäßigen Bodenhebungen. Die Verteilung der Bodenbewegungen zeigt, dass signifikant erhöhte Bodenbewegungsgradienten nur an den von tektonischen Hauptstörungen (Heerleider Sprung und Feldbiß) gebildeten Abbaurändern im nord-östlichen Randbereich des Reviers auftreten.

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Bodenhebungen im Bereich des Heerleider Sprunges verdeutlicht das in Abb. 7 dargestellte Profil anhand einer Auswertung von InSAR-Daten für die Periode 1992 bis 2014. Hier haben sich die Bodenbewegungen über die den Abbau der Grube Maurits begrenzende tektonische Störungszone Heerleider Sprung hinweg weitgehend kontinuierlich entwickelt, ohne einen signifikanten Unstetigkeitsbereich auszubilden. Schäden infolge ungleichmäßiger Bodenbewegungen wurden hier bisher nicht festgestellt. Bei der Interpretation der in Abb. 7 dargestellten Bodenbewegungsprofile ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich nicht um tatsächlich im Profilverlauf gelegene Messpunkte handelt, sondern um rechnerisch anhand von auch außerhalb des Profils gelegenen Messpunkten interpolierte Datensätze. Dadurch ist nicht auszuschließen, dass sich lokal möglicherweise doch kleinere unstetige Zonen ausgebildet haben.

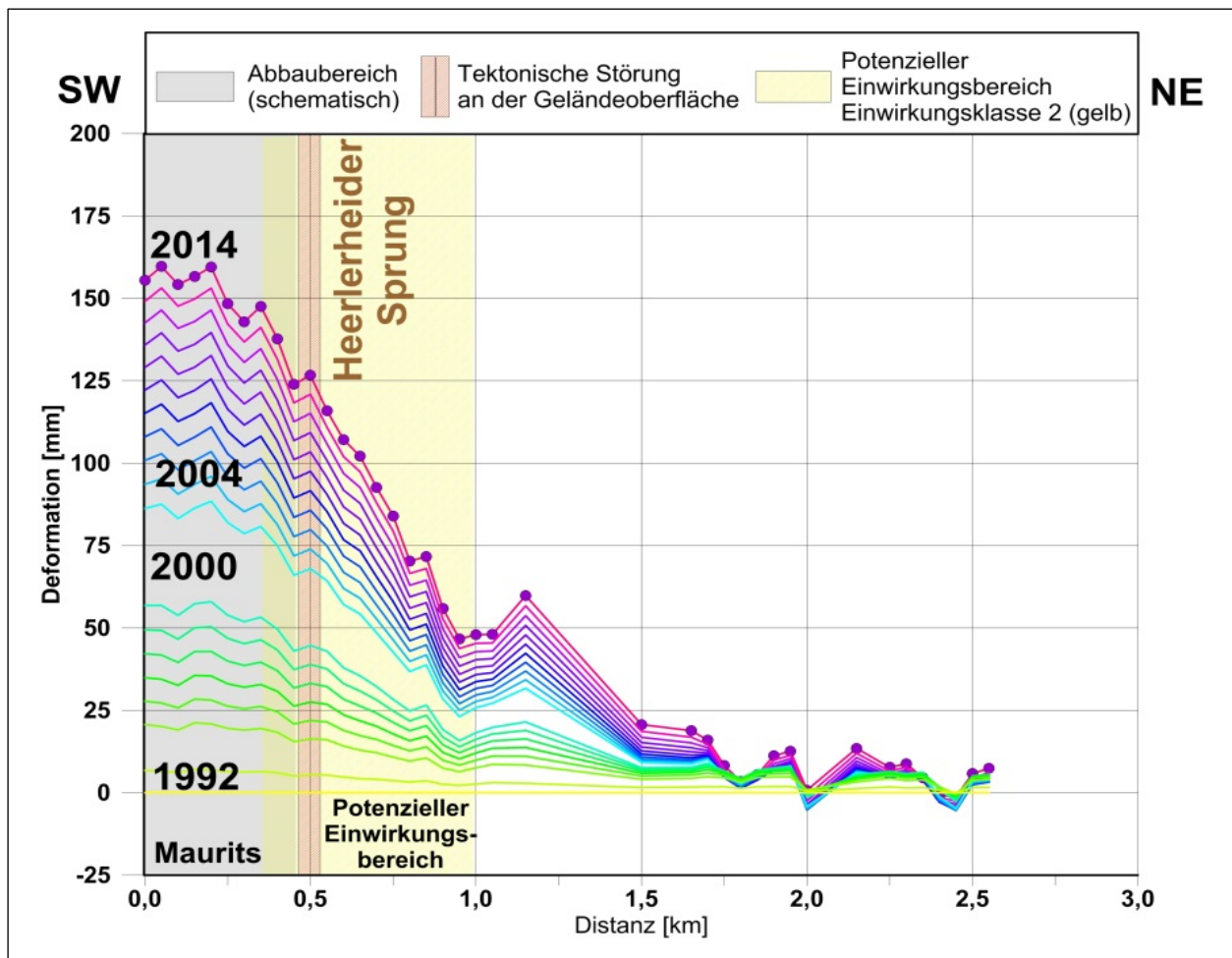


Abb. 7: Entwicklung der Bodenhebungen im Bereich des Abbaurandes der Grube Maurits am Heerleider Sprung in Geleen - Periode 1992 bis 2014 (Interpolation von InSAR-Daten)

Auf der Basis der Prognosen für den weiteren Grubenwasseranstieg und der weiteren Entwicklung der Grundwasserstände im Deckgebirge (Grundwassermodell) wurden auch Prognosen über die

noch zu erwartenden Bodenhebungen abgeleitet. Es wurden Dekompaktionskoeffizienten für das Steinkohlengebirge und das Deckgebirge anhand der bereits gemessenen Bodenbewegungen zurückgerechnet und auf der Grundlage der in den Niederlanden einschlägigen Einflussfunktion von GEERTSMA (1973) die in den Haupthebungsbereichen noch zu erwartenden Hebungsbeträge abgeschätzt. Danach wird zukünftig noch mit Hebungen in einer Größenordnung von maximal rd. 0,15 m gerechnet. Damit würden sich die im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Südlimburger Revier aufgetretenen Bodenhebungen zu Beträgen von maximal rd. 0,5 m aufsummieren. Dies entspricht etwa 4 bis 5 % der in den Abbauschwerpunkten maximal aufgetretenen Bodensenkungen. Gegenüber anderen Revieren ist dieser Prozentanteil vor allem aufgrund der verstärkten Dekompaktion des Deckgebirges vergleichsweise erhöht.

Im Hinblick auf die Bewertung der zukünftig noch zu erwartenden Risiken durch ein Auftreten von ungleichmäßigen Bodenhebungen/Unstetigkeiten ist zu berücksichtigen, dass der größte Teil der zu erwartenden Bodenhebungen bereits erfolgt ist, ohne dass Unstetigkeiten erkannt wurden oder Schäden aufgetreten sind. Die bisherigen Erfahrungen aus anderen Stilllegungsbereichen des Steinkohlenbergbaus im Aachener, Erkelenzer und Ruhrrevier zeigen, dass nur unter sehr spezifischen geologisch-hydrogeologischen und bergbaulichen Voraussetzungen mit der Ausbildung von größeren Bodenbewegungsgradienten bis hin zu Unstetigkeiten zu rechnen ist. Für die Bewertung des Einwirkungspotenzials wurden die in den letzten Jahren für das Ruhrrevier erarbeiteten Bewertungskriterien herangezogen (HEITFELD ET AL., 2014). Dieser Ansatz sieht eine Klassifikation in drei Einwirkungsklassen (EK 1 bis EK 3) unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von schadensrelevanten Unstetigkeiten vor. Dabei wird neben dem Vorhandensein einer den Abbau begrenzenden tektonischen Hauptstörung vor allem auch der Einfluss des Grubenwasseranstiegs auf die Grundwasserverhältnisse im Deckgebirge sowie das Vorhandensein von Unstetigkeiten aus der Abbauphase im Störungsbereich berücksichtigt. Im vorliegenden Fall wurde bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeiten zusätzlich auch der schadensfreie Verlauf des bereits weit fortgeschrittenen Grubenwasseranstiegs berücksichtigt.

Für das Südlimburger Revier wurden so drei potenzielle Einwirkungsbereiche an den abbaubegrenzenden Hauptstörungen Heerlerheider Sprung und Feldbiß im Bereich der Hebungsschwerpunkte ausgewiesen, in denen derzeit Schäden infolge ungleichmäßiger Bodenhebungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können (Abb. 6). Diese Bereiche wurden der Einwirkungsklasse 2 (mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit, gelbe Zone) und der Einwirkungsklasse 3 (geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, blaue Zone) zugewiesen. Auch in diesen Bereichen werden aber keine schweren, substantiellen Gebäudeschäden mehr erwartet. Außerhalb dieser Bereiche werden keine schadensrelevanten ungleichmäßigen Bodenbewegungen erwartet.

Für die ausgewiesenen Einwirkungsbereiche wurde ein Detailmonitoring anhand von repräsentativen geodätischen Messlinien im Störungsbereich empfohlen. Die regionale Überwachung der Bodenbewegungen soll anhand von Satellitendaten (InSAR) vorgenommen werden.

Die Bewertung soll durch vor Ort-Untersuchungen am Heerlerheider Sprung überprüft werden; in diesem Zusammenhang soll geklärt werden, ob der Heerlerheider Sprung im oberflächennahen Bereich als singuläre Störungsbahn/Scherfläche ausgebildet ist, an der sich bevorzugt auch eine Unstetigkeit ausbilden könnte oder eine Auffiederung in mehrere Störungsbahnen vorliegt.

5.2 *Veränderungen im Grundwasser des Deckgebirges*

Das hydraulische System ist durch die bergbaulichen Einwirkungen gegenüber den natürlichen Verhältnissen grundlegend verändert. Im Niveau des Steinkohlengebirges sind weiträumig hydraulische Verbindungen geschaffen worden, die einen hydraulischen Kurzschluss zwischen dem Wiederergänzungsgebiet im Südosten (Wurmtal) und den nordwestlichen Teilen des Reviers bewirken (Abb. 4). Dort, wo das hydraulische Potenzial im Steinkohlengebirge höher steigt als die Druckhöhen/Wasserstände in den Deckgebirgsaquiferen, kann Grubenwasser in die Deckgebirgsschichten infiltrieren und hier die Grundwasserqualität beeinflussen. Dort, wo die Wasserstände auch in oberflächennahen Bereichen signifikant ansteigen, können in Bereichen mit geringen Flurabständen Vernässungen auftreten.

Im Rahmen der Risikobewertung war zu klären, wie hoch die Grubenwasser- und Grundwasserstände in den einzelnen Deckgebirgshorizonten ansteigen können, in welchen Bereichen es dadurch zu einer Infiltration von Grubenwasser kommen kann und welche Grubenwassermengen in welcher Qualität dann in das Deckgebirge infiltrieren. Zur Klärung dieser Fragen wurde für verschiedene Szenarien eine Modellierung des erwarteten Endzustandes nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs vorgenommen. Grundlage war ein bestehendes Deckgebirgsgrundwassermodell (IBRAHYM) an welches das Steinkohlengebirge in Form von zusätzlichen Modellschichten angekoppelt wurde.

Auf der Grundlage der Modellierung wurde für das wahrscheinlichste Szenario ein Grubenwasseranstieg im Südosten des Reviers bis rd. 80 mNHN ermittelt. Im Endzustand sinkt das Standwasserniveau im Grubengebäude bis in den zentralen Bereich des Reviers nur wenig ab (rd. 70 mNHN). Zur Grube Maurits im Nordwesten des Reviers besteht keine direkte hydraulische Verbindung (vgl. Abb. 4); hier wird mit niedrigeren Standwasserniveaus um 40 mNHN gerechnet. Auf dieser Grundlage wurde im zentralen Bereich des Reviers eine Fläche ausgewiesen, wo ein Aufsteigen von Grubenwasser in das Deckgebirge nicht ausgeschlossen werden kann (Abb. 8). Für diese Bereiche wurden die möglichen Veränderungen der Grundwasserqualität mit hydrochemischen Transportmodellen (MT3DMS, PHREEQC) simuliert. Danach ist insbesondere im Bereich zwischen Heerlerheider Sprung und Benzenrader Sprung ein Anstieg der Chlorid- und Sulfat-Gehalte in dem Kreidekalksteinaquifer zu erwarten. In diesem Bereich liegen auch Wassergewinnungsanlagen, die durch die Veränderung der Wasserqualität möglicherweise beeinflusst werden.

Die Modellierung für diesen Bereich beruht auf Annahmen über die Grubenwasserqualität aus der Betriebsphase. Angaben zur aktuellen Grubenwasserqualität in diesem Bereich liegen nicht vor. Die qualitativen Angaben haben daher nur eine begrenzte, grundsätzliche Aussagekraft. Andererseits ist mit Auswirkungen erst in der Endphase oder nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs zu rechnen. Wesentliche Maßnahmen zur Konkretisierung der Risikobewertung sind daher die Ermittlung aussagekräftiger Basisdaten durch Herstellung zusätzlicher Grundwassermessstellen in den betroffenen Bereichen, ein entsprechend angepasstes Monitoring sowie die Überprüfung der Modellvorstellungen anhand der zusätzlichen Erkenntnisse.

Die anhand der Grundwassermodellierung ermittelten Veränderungen der oberflächennahen Grundwasserstände sind auf den Dezimeterbereich beschränkt. Einwirkungen auf die Geländeoberfläche in Form von Vernässungen werden daher nur lokal in einigen Talbereichen erwartet (Abb. 8).

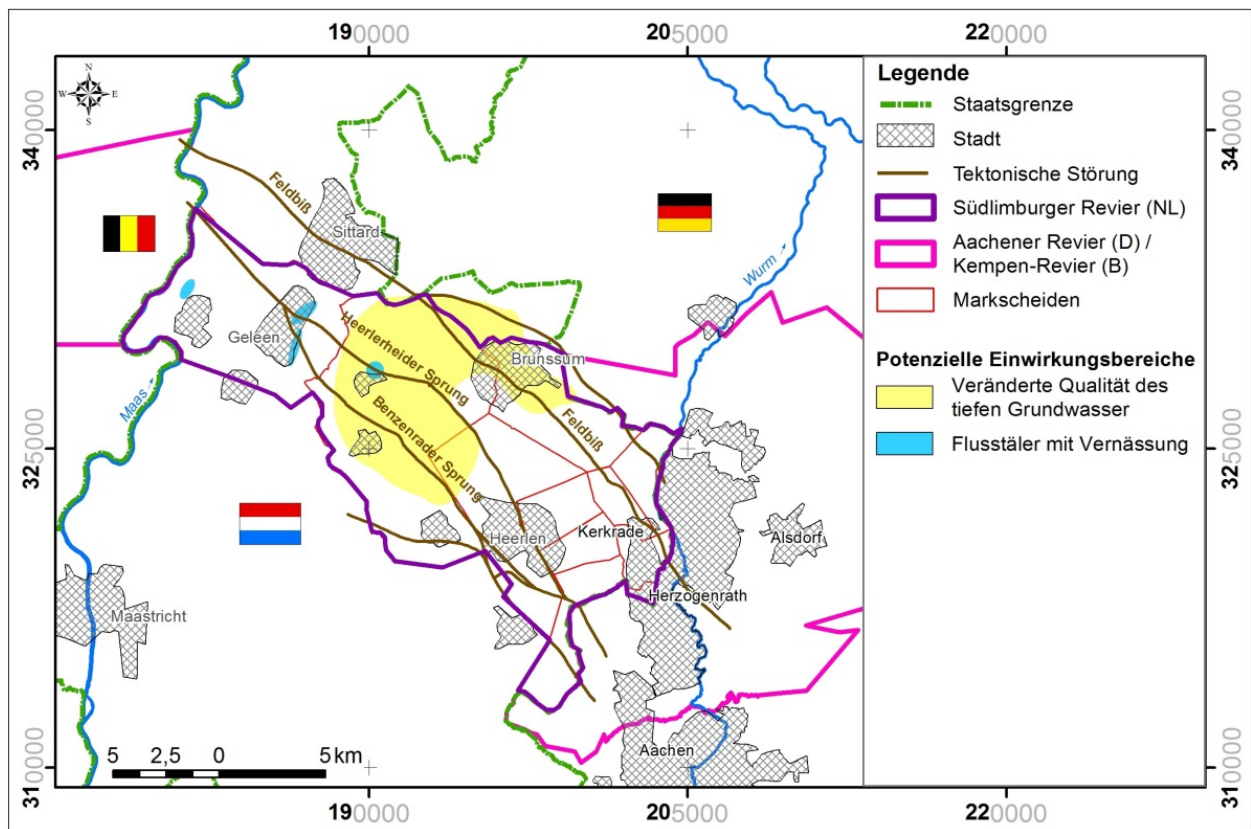


Abb. 8: Potenzielle Einwirkungsbereiche mit Veränderung der Grundwasserqualität im basalen Deckgebirge und Auftreten von Vernässungszonen an der Geländeoberfläche

5.3 Grubengasaustritte

Zukünftig sind Grubengasaustritte nur noch in einem begrenzten Gebiet im südöstlichen Teil des Reviers möglich, wo die Grubenbaue noch nicht vollständig eingestaut sind (Abb. 3). Dieses Gebiet wird sich mit dem weiteren Grubenwasseranstieg verkleinern, aber nicht vollständig verschwinden. In diesem Teil des Reviers ist das Grubengas heute gekennzeichnet durch erhöhte Konzentrationen an Kohlendioxid (um 10 Vol.-%) und nur unbedeutende Methan-Gehalte.

Das Risiko bei Ansammlung von Gasen in geschlossenen Räumen besteht somit im Wesentlichen in der Sauerstoffarmut und der daraus resultierenden Erstickungsgefahr. Risikozonen können dort entstehen, wo Auflockerungszonen, Bohrungen oder Schächte bevorzugte Migrationswege für das Grubengas bereitstellen. Dies betrifft insbesondere den Bereich des historischen Altbergbaus in Kerkrade. Auch bei Bohrarbeiten muss das Risiko von plötzlichen Entgasungen berücksichtigt werden.

Es wurde empfohlen, im Bereich Kerkrade eine Bestandsaufnahme der in den Ausgasungsschutz-zonen der Schächte gelegenen Gebäude im Hinblick auf gaswegsame Rissbildungen auszuführen. Auf dieser Grundlage soll auch ein Gas-Monitoring entwickelt werden. Für das Kanalsystem in Kerkrade wird eine Kombination der Kanalbefahrungen mit Gasmessungen empfohlen. Für neue Gebäude sollen erforderlichenfalls Gasdrainagen berücksichtigt werden.

5.4 Mikro-Erdbeben

Unter dem Eindruck der massiven Schäden, die in der Vergangenheit in Groningen durch die durch die Gasgewinnung induzierten Erdbeben hervorgerufen wurden, war auch eine entsprechende Bewertung des Erdbebenrisikos im Bereich des Grubenwasseranstiegs vorzunehmen. Hintergrund waren dabei auch zwei seismische Ereignisse, die im südwestlichen Randbereich des Südlimburger Revier in 1985/86 sowie 2000-2002 an einer tektonischen Störung aufgetreten sind („Voerendaal-Schwärme“, Magnitude maximal $M_L 3,9$ in 2001).

Es wurde untersucht, inwieweit die durch den Grubenwasseranstieg bewirkten Massenveränderungen im Untergrund und/oder reduzierte Scherfestigkeiten an der Störungszone diese Erdbeben-schwärme haben auslösen können. Da konkrete Daten insbesondere zur Ausbildung der Störung fehlen, war im Wesentlichen nur eine überschlägige Plausibilitätsprüfung möglich. Es zeigte sich ein gewisser zeitlicher Zusammenhang zwischen den Hauptanstiegsphasen des Grubenwasseranstiegs (verbunden mit einer plötzlichen Veränderung der Massen und der Spannungsverhältnisse im Untergrund) und dem Auftreten der Mikro-Erdbeben. Ein signifikanter kausaler Zusammenhang konnte aber nicht hergestellt werden.

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass das natürlicherweise in Südlimburg vorhandene Erdbebenrisiko durch den Grubenwasseranstieg nicht verändert wurde und somit auch keine gesonderten Maßnahmen erforderlich sind.

6 Nachwirkungen des Altbergbaus (unabhängig vom Grubenwasseranstieg)

6.1 Historische Schächte des tages- und oberflächennahen Altbergbaus

Im Bereich Kerkrade wurden auf der Grundlage vorhandener Schachtlisten und ergänzender Grubenrissauswertungen insgesamt 59 Schächte des historischen Altbergbaus identifiziert (Abb. 9). Den Schächten wurden Schachtschutzzonen zugewiesen, in denen Einwirkungen auf die Geländeoberfläche nicht ausgeschlossen werden können. Unter Berücksichtigung von Lageungenauigkeiten von ± 10 bis 30 m und Deckgebirgsmächtigkeiten im Zehner-Meter Bereich ergaben sich so Schachtschutzzonen mit Durchmessern bis zu 80 m.

Die Schächte wurden entsprechend der Flächennutzung in den ausgewiesenen Schachtschutzzonen in drei Klassen eingeteilt; diese Einteilung bildet die Grundlage für die Aufstellung einer Prioritätenliste für zukünftige Maßnahmen an den historischen Schächten. Es wurde empfohlen, zunächst die Schächte exakt zu lokalisieren und dann auf der Grundlage einer aktualisierten Risikobewertung nach einer Prioritätenliste die Schächte im Bedarfsfall zu sichern. Bis dahin sollen regelmäßige Kontrollbegehungen durchgeführt werden. Im Rahmen eines Pilotprojektes sollen verschiedene Verfahren zur Lokalisierung der Schächte in Kerkrade getestet werden. Zusätzlich werden bei zukünftigen Baumaßnahmen die Risiken aus den historischen Schächten berücksichtigt.

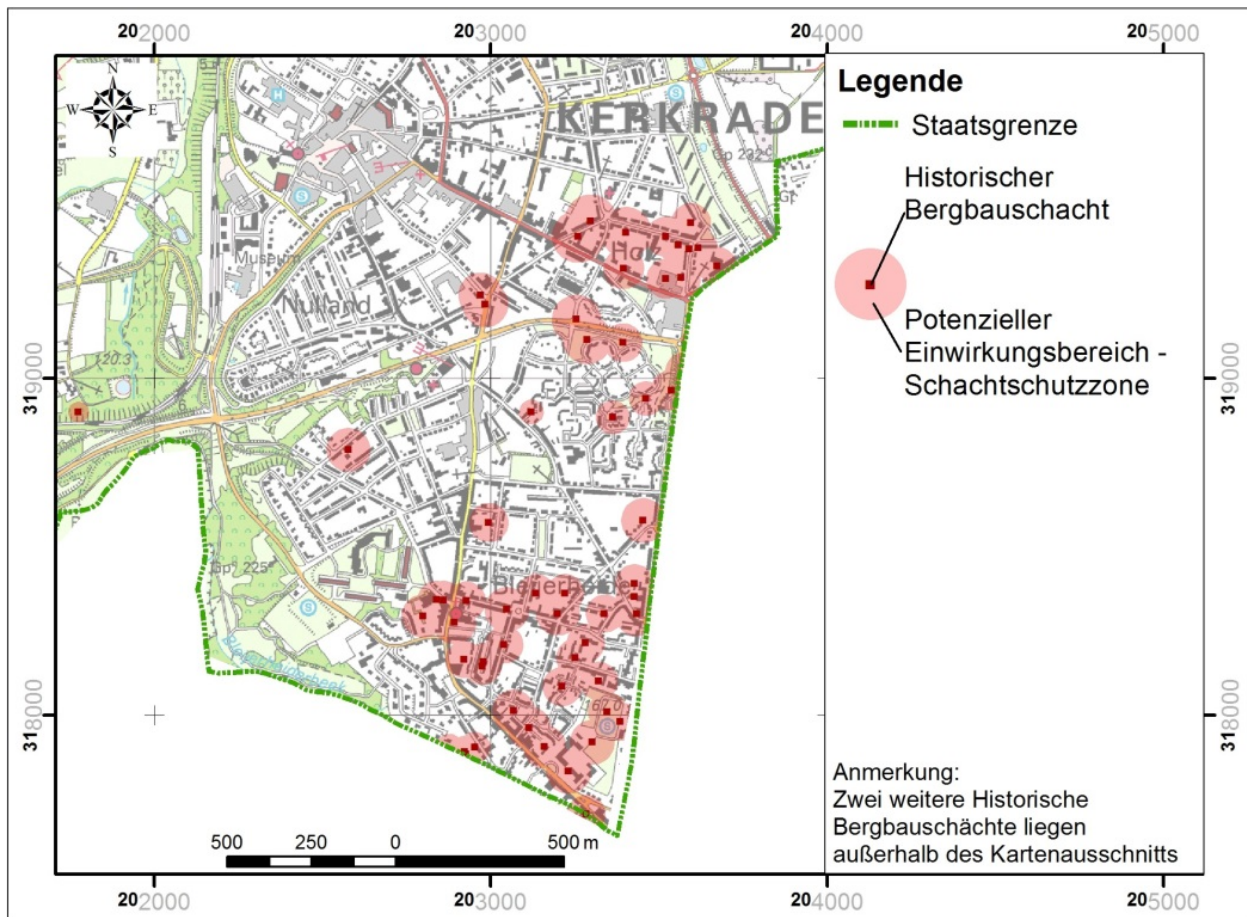


Abb. 9: Historische Schächte des Altbergbaus in Kerkrade mit Schachtschutzzonen

6.2 Schächte des industriellen Tiefbergbaus

In den Bereichen des industriellen Tiefbergbaus sind insgesamt 39 Schächte mit Teufen zwischen einigen hundert und tausend Metern dokumentiert. Die Schächte wurden zumeist in den 1960er und 1970er Jahren durch Einbringen eines kohäsiven Betonpfropfens im Niveau der Karbonoberfläche und nachfolgender Verfüllung gesichert. Für diese Schächte war in den Archiven zumeist eine gute Dokumentation des Ausbaus und der Sicherungsmaßnahmen vorhanden.

Die durchgeführten Sicherungsmaßnahmen wurden entsprechend den heute in Nordrhein-Westfalen für Schachtsicherungsmaßnahmen zugrunde gelegten Kriterien ("Stand der Technik") bewertet. Dabei zeigte sich, dass drei Schächte als dauerstandsicher angesehen werden können, während sechs Schächte weitergehende Untersuchungen und möglicherweise zusätzliche Sicherungsmaßnahmen erfordern, u.a. wegen einer zu gering bemessenen Höhe des kohäsiven Füllstopfens. Für die übrigen 30 Schächte wurde ein regelmäßiges Monitoring empfohlen.

6.3 Historischer tagesnaher Abbau

Der auf eine Fläche von rd. 2 km² begrenzte Bereich des historischen Altbergbaus in Kerkrade (Abb. 3) ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Ausbisslinien der steil stehenden, gefalteten Flöze (insgesamt rd. 17 km). Das Einwirkungspotenzial dieses tagesnahen Abbaus wurde entsprechend der Vorgehensweise für den Altbergbaubereich auf deutscher Seite, in der Nachbargemeinde

Herzogenrath, bewertet. Unter Berücksichtigung des Flözeinfallens, der Flözmächtigkeit, dem Dokumentationsstand über tatsächlich ausgeführten Abbau und bereits gefallenen Tagesbrüchen wurde eine Einstufung in drei Einwirkungsklassen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tagesbrüchen, Senkungen/Setzungen vorgenommen (EK1/EK2/EK3, hohe/mittlere/geringe Wahrscheinlichkeit, rote/gelbe/blau Zone).

Im Bereich der Gemeinde Kerkrade dominieren Ausbissbereiche der Einwirkungsklassen 2 und 3. Das Tagesbruchrisiko wird insgesamt als gering bewertet; bisher sind hier keine größeren Schäden aufgetreten. Proaktive Sicherungsmaßnahmen werden daher als unverhältnismäßig bewertet. Es wurde empfohlen, die potenziellen bergbaulichen Einflüsse entsprechend der Vorgehensweise in Nordrhein-Westfalen bei zukünftiger Bebauung zu berücksichtigen.

6.4 Industrieller oberflächennaher Abbau

Durch ein im Jahr 2011 in Heerlen aufgetretenes Tagesbruchereignis wurde für das Südlimburger Revier ein weiteres Risiko aus dem Steinkohlenbergbau offenbar, das in dieser Form bisher auch in anderen Steinkohlenrevieren nicht betrachtet wurde. In einem Bereich mit rd. 80 m Deckgebirgsüberlagerung aus Kreidekalksteinen und tertiären Sanden und Schluffen hat sich oberhalb eines Flözabbaus ein vertikaler Bruchschlot entwickelt, der an der Tagesoberfläche zu einem Bruch führte und letztlich den Teilabriss eines Einkaufszentrums erforderlich machte (KLÜNKER ET AL., 2013).

Nach heutigem Kenntnisstand geht man von folgenden maßgeblichen Ursachen des Tagesbruches aus (Abb. 10): der Abbau wurde bis etwa 8 m an die Karbonoberfläche heran geführt, aufgrund der spitzwinkligen Abbaugeometrie haben sich vermutlich Resthohlräume erhalten, das überlagernde Kalksteinpaket ist verkarstet, die hangenden tertiären Sande sind fließfähig. Aus der Abbauphase war eine Erdstufenbildung („Drempel“) vor der Abbaufont bekannt. Wahrscheinlich ist der Bruchschlot in der Bruchzone an der Abbaufont entstanden. Nach einem Verbuch der geringmächtigen Gesteinsfeste oberhalb des Abbaus sind über einen langen Zeitraum tertiäre Sande über Verkarstungszonen in den Kalksteinen in die verbliebenen Abbauhohlräume geflossen. Ob der Anstieg des Grubenwassers bis an die Karbonoberfläche einen weiteren Faktor darstellt, ist nicht klar.

Im Rahmen der Bearbeitung wurden insgesamt 46 Bereiche mit vergleichbaren spitzwinkligen Abbaufonten in einem Teufenbereich bis 20 m unterhalb der Karbonoberfläche als potenzielle Primärbruchzonen eines solchen Tagesbrucheszenarios identifiziert. Für diese Bereiche wurde vorsorglich an der Geländeoberfläche ein potenzieller Einwirkungsbereich ausgewiesen.

Es wurde empfohlen, das Einwirkungspotenzial derartiger Bereiche zunächst anhand eines Pilotprojektes an einem weiteren charakteristischen Standort zu untersuchen. Auf dieser Grundlage sollen die Bewertungsansätze verifiziert und die Ausweisung der Einwirkungsbereiche angepasst werden. Bei Neubauprojekten in diesen Bereichen soll zunächst das spezifische Risiko eines derartigen Tagesbruches in den Planungen mit berücksichtigt und gegebenenfalls untersucht werden.

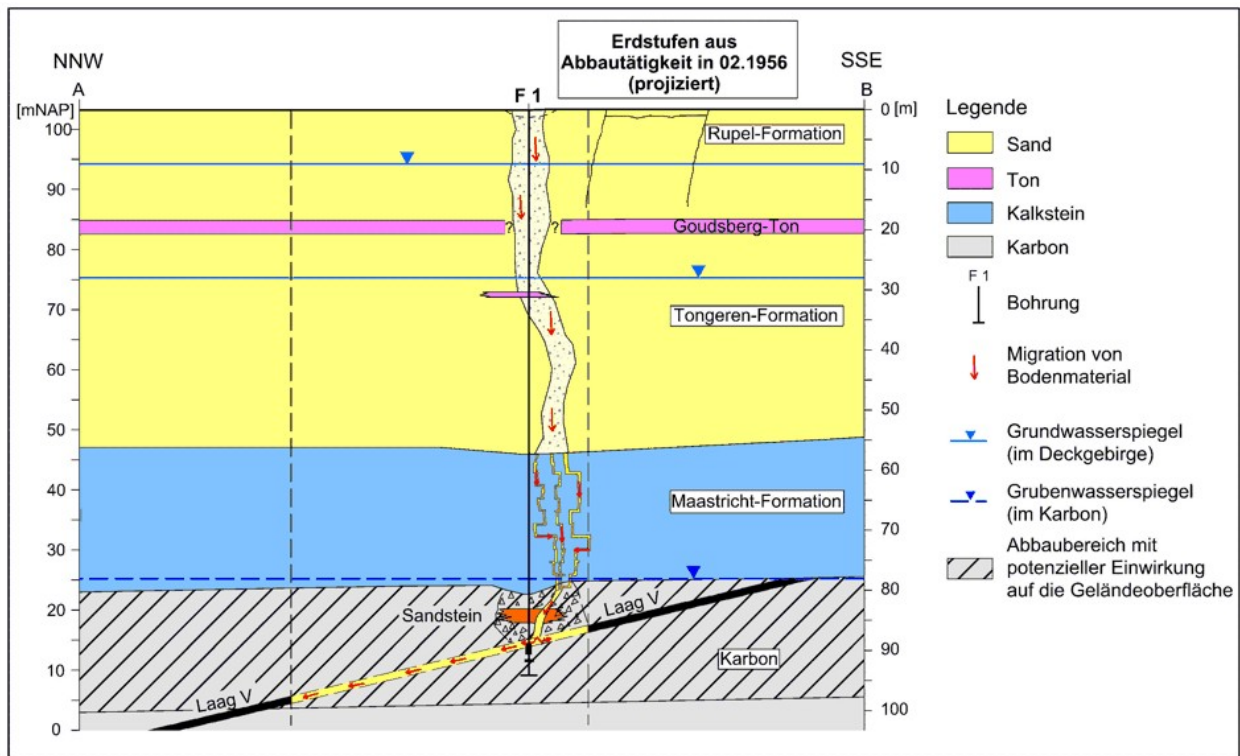


Abb. 10: Tagesbruch über industriellem Abbau nah der Karbonoberfläche im Bereich t'Loon, Heerlen

6.5 Unstetigkeiten, Tagesbrüche, Bohrlöcher

Als Grundlage für eine Bewertung weiterer bergbaulicher Einwirkungen auf die Geländeoberfläche oder die Grundwasserverhältnisse wurde eine Bestandsaufnahme der im Grubenbild dokumentierten Erdstufen („Drempels“), Tagesbrüche („Verzakkingen“) und Bohrungen vorgenommen. Dabei wurden auch die von der Geländeoberfläche aus bis in das Karbon abgeteufte alten Lagerstättenbohrungen sowie die aus den deckgebirgsnahen Grubenbauen heraus nach oben in das Deckgebirge hergestellten Entwässerungs- oder Erkundungsbohrungen dokumentiert.

Die Bohrungen können als bevorzugte hydraulische Verbindung zwischen Steinkohleneberge und den überlagernden basalen Deckgebirgsschichten oder als hydraulische Verbindung zwischen verschiedenen Deckgebirgsstockwerken von Bedeutung sein. Erdstufen und Tagesbrüche aus der Abbauphase charakterisieren Bereiche mit möglicherweise aufgelockertem Untergrund.

Diese Relikte stellen zunächst kein spezifisches Risiko dar, sollten aber bei der Ursachenforschung von Veränderungen im Untergrund oder aber auch bei Bauvorhaben berücksichtigt werden.

7 Grundlage des Monitoring- und Maßnahmenkonzeptes

Im Rahmen der integrierten Risikoanalyse wurde eine Kosten-Nutzen-Bewertung der von den einzelnen Arbeitsgruppen vorgeschlagenen Maßnahmen unter Berücksichtigung des Risikopotenzials der einzelnen betrachteten Nachwirkungen des Steinkohlenbergbaus durchgeführt. Zahlreiche Maßnahmen sind unter mehreren Aspekten sinnvoll und wichtig, wie z.B. das Monitoring des Grund- und Grubenwassers; andere Maßnahmen können unter einem bestimmten Aspekt sinnvoll, unter

Berücksichtigung der Kosten und des ermittelten Risikopotenzials aber unverhältnismäßig sein (wie z.B. eine seismische Studie).

Die Effektivität der vorgeschlagenen Maßnahmen wurde anhand einer Matrix nach den Faktoren „Nutzen“ und „Kosten“ bewertet. Dabei wurden fünf Bewertungskategorien zwischen „unverzichtbar“ (Cat. 0) und „aktuell unverhältnismäßig“ (Cat. 4) unterschieden (Abb. 11). Für die letztlich empfohlenen Maßnahmen (Cat. 0 bis Cat. 2, Abb. 12) wurde ein detaillierter Maßnahmenplan ausgearbeitet. Für einige Monitoringmaßnahmen, wie geodätische Detailmesslinien und Grundwassermessstellen, wurden konkrete Standorte vorgeschlagen.

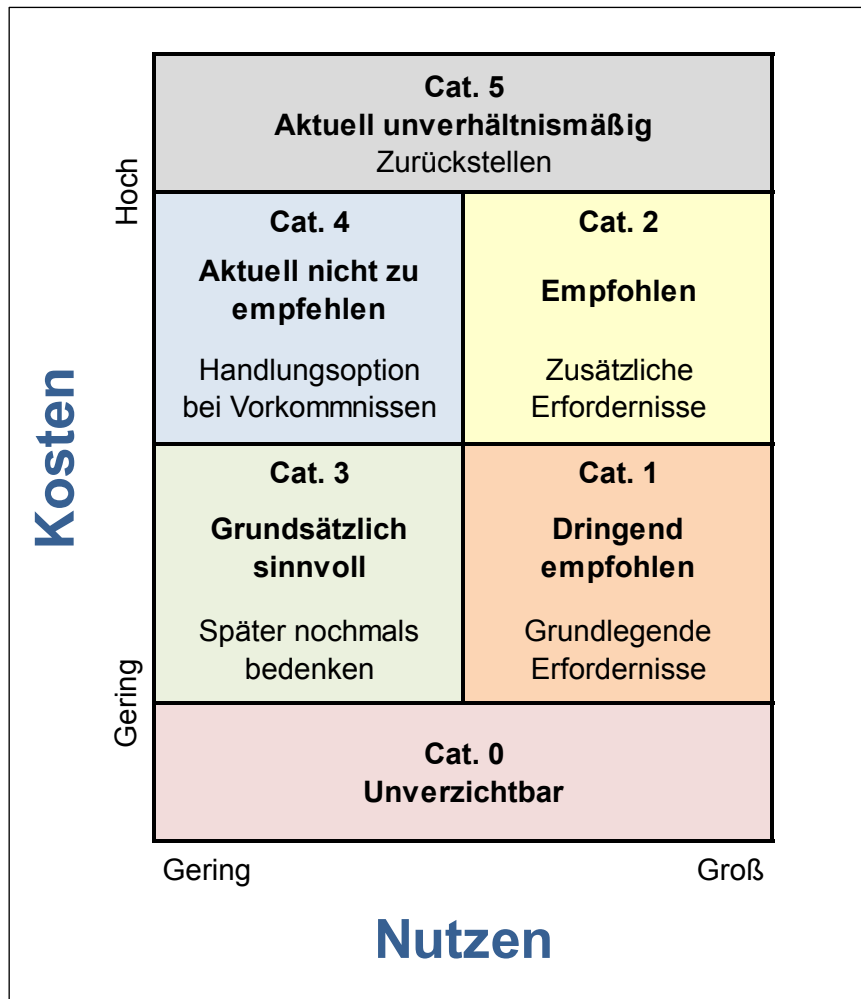


Abb. 11: Matrix zur Bewertung der Effektivität der vorgeschlagenen Maßnahmen

Grundsätzlich wurde auch die Option der Wiederaufnahme einer dauerhaften Schutzwasserhaltung diskutiert. Damit ließen sich potenzielle Einwirkungen auf das Grundwasser im Deckgebirge vermeiden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Gewinnung von Grundwasser aus den Kreidekalksteinen im Revier von besonderer Bedeutung. Für die übrigen Einwirkungspotenziale wurde kein signifikanter Nutzen gesehen. Demgegenüber stehen erhebliche, auf „ewig“ angelegte Aufwendungen für das Heben, Aufbereiten und Ableiten des Grubenwassers. In der Gesamtbetrachtung wurde eine Schutzwasserhaltung angesichts des begrenzten und unsicheren Risikopotenzials als unverhältnismäßig bewertet. Vielmehr wird der Schwerpunkt auf ein umfassendes Monitoring der Grundwasserverhältnisse im Deckgebirge und Verifizierung der Risiken gelegt. Die Option einer

Schutzwasserhaltung bleibt dennoch bestehen; der Wasserhaltungsschacht im Feld Domaniale kann jederzeit entsprechend ausgerüstet werden.

Cat. 0 - Unverzichtbar	Cat. 1 - Dringend empfohlen	
<p style="text-align: center;">Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bewusstseinsentwicklung - Kommunikation - Regionale Entwicklungsplanung - Angepasste Baugrunduntersuchungen bei Bauvorhaben - Angepasste Bebauungsrichtlinien <p>Temporäre Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monitoring der Schächte des Altbergbaus - Minderung von Oberflächenwasserzutritten in den Schachtbereichen - Begrenzung der Lasten im Schachtumfeld - Begrenzung der Lasten auf den Schachtköpfen 	<p style="text-align: center;">Monitoring</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monitoring Grubenwasserniveau - Monitoring Grundwasserstände - Monitoring Grundwasserqualität - Monitoring industrielle Schächte - Begegehungen historische Schächte - Detailliertes Monitoring der Bodenhebungen in drei potenziellen Einwirkungsbereichen - Grubengasmessungen 	<p style="text-align: center;">Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sicherungsmaßnahmen an 6 Schächten des industriellen Tiefbergbaus - Installation von Messeinrichtungen an den Schächten des industriellen Tiefbergbaus - Bereitstellung von Gasmessgeräten - Bestandsaufnahme von Gebäuden im Hinblick auf Einwirkungen von Grubengas - Herstellung zusätzlicher Grundwassermessstellen - Installation von Messsonden in Grundwassermessstellen - Einrichtung von geodätischen Detailmessprofilen in den drei potenziellen Einwirkungsbereichen
	Cat. 2 - Empfohlen	
	<p style="text-align: center;">Monitoring</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monitoring Bodenhebungen: InSAR - regionale Übersicht 	<p style="text-align: center;">Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erkundungs- und Sicherungsmaßnahmen an Schächten des Altbergbaus

Abb. 12: Empfohlene Maßnahmen und Monitoring

Im Rahmen der Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen ist zunächst die umfassende Information der betroffenen Gemeinden und Körperschaften in der Region von Bedeutung. Private Planer, Architekten und Bohrgesellschaften sind Multiplikatoren, die für die Bewusstseins-schaffung in der Bevölkerung eingebunden werden sollten. Die aufgezeigten Risiken sollten kurzfristig in die Bauungs- und Flächenplanung sowie die Baugenehmigungspraxis einbezogen und entsprechende Regularien aufgestellt werden. Für die Durchführung von Schachtsicherungsmaßnahmen müssen eine Prioritätenliste und ein Zeitplan aufgestellt werden. Darüber hinaus müssen vorbereitende Maßnahmen durchgeführt werden, um das empfohlene Monitoring umzusetzen (Herstellung von Grundwassermessstellen, Einrichtung von geodätischen Messlinien, Bereitstellung von Geräten zur Grubengasüberwachung). In einem weiteren Schritt müssen die Monitoringmaßnahmen etabliert und entsprechende Zuständigkeiten geregelt werden. Die Ergebnisse des Monitoring sollen in Jahresberichten dokumentiert und bewertet werden. Auf dieser Grundlage können die Risikobewertung fortgeschrieben und die Maßnahmen angepasst werden.

Die Ergebnisse der Studie und die resultierenden Empfehlungen wurden im Auftrag des niederländischen Wirtschaftsministeriums durch die British Coal Authority bewertet. Dadurch sollte ein Abgleich von Verhältnismäßigkeit und Vollständigkeit der empfohlenen Maßnahmen mit den umfangreichen Erfahrungen in Großbritannien erreicht werden. Die British Coal Authority hat den Maßnahmen- und Monitoringkatalog vom Grundsatz her bestätigt und vor allem auf die Notwendigkeit des Erhalts und der Schaffung von lokalen Kompetenzen zum Umgang mit den Nachwirkungen des Steinkohlenbergbaus hingewiesen (THE COAL AUTHORITY, 2016).

8 Ausblick

Mit der Veröffentlichung der Studie im Internet im Dezember 2016 hat das niederländische Wirtschaftsministerium die vollständige Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen zugesagt. Bei der Provinz Limburg wurden eine Internetseite und eine Telefonnummer eingerichtet, über die Informationen zur Bergbauthematik abgefragt werden können. Die Ergebnisse der Studie wurden den verschiedenen Gremien der Provinz und der Gemeinden in mehreren Terminen präsentiert. Die Daten und georeferenzierten Grubenrisse werden den Gemeinden zur Verfügung gestellt.

Weitere Schwerpunkte bei der Umsetzung der Maßnahmen in 2017 sind mehrere Pilotprojekte zur Verifizierung der Aussagen der Studie sowie die Schaffung eines „Kompetenzzentrum Nachbergbau“ bei der Provinz Limburg. Dieses Kompetenzzentrum soll die Kommunen und Körperschaften zukünftig bei der Bewertung der Risiken aus bergbaulichen Hinterlassenschaften und der Umsetzung der Maßnahmen unterstützen.

LITERATURVERZEICHNIS

PROJECTGROUP GS-ZL (2016): Na-ijlende gevolgen steenkolenwinning Zuid-Limburg.- Studie zu den Nachwirkungen des Steinkohlenbergbaus im niederländischen Südlimburg im Auftrag des niederländischen Wirtschaftsministeriums, 5 Berichte der Arbeitsgruppen, Zusammenfassende Risikoanalyse und Kurzfassung veröffentlicht auf der Projektseite des Wirtschaftsministeriums der Niederlande (Ministerie van Economische Zaken) mit PDF-Dokumenten für alle Teilberichte der Studie

(<https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2016/12/15/geen-directe-veiligheidsrisico%E2%80%99s-door-voormalige-steenkolenwinning-in-limburg>; Internet-Link vom 20.02.2017)

GEERTSMA, J. (1973): Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs, J. Petroleum Technology, June 1973, S. 734-744.

HEITFELD, M., ROSNER, P. & MÜHLENKAMP, M. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier - ein Ansatz zur Bewertung der Risiken.- 14. Altbergbau-Kolloquium, S. 41-60, 8 Abb.; Gelsenkirchen.

KLÜNKER, J., HORDIJK, D. & HEITFELD, M. (2013): Tagesbruchbedingter Abriss eines Einkaufszentrums im Innenstadtbereich von Heerlen/Niederlande - Erkundung und Nachweis bergbaulicher Ursachen.- 13. Altbergbau-Kolloquium, S. 12-25; 9 Abb.; Freiberg.

ROSNER, P. (2011): Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge.- Diss. RWTH Aachen, 194 S., 67 Abb., 7 Tab., 4 Anh., 7 Anl.; Aachen. (<http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2011/3741/pdf/3741.pdf>; Internet- Link vom 20.02.2017).

THE COAL AUTHORITY (2016): Mining Risk Policy Advice on “Na-ijlende gevolgen steenkolenwinning Zuid-Limburg”.- Gutachten im Auftrag des niederländischen Wirtschaftsministeriums, 20 S., 1 Abb., 2 Anh.; Mansfield (UK).

(<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2016/12/15/mining-risk-policy-advice-on-na-ijlende-gevolgen-steenkolenwinning-zuid-limburg/Mining+Risk+Policy+advice+on+%27na-ijlende+gevolgen+steenkolenwinning+Zuid-Limburg%27.pdf>; Internet-Link vom 20.02.2017)