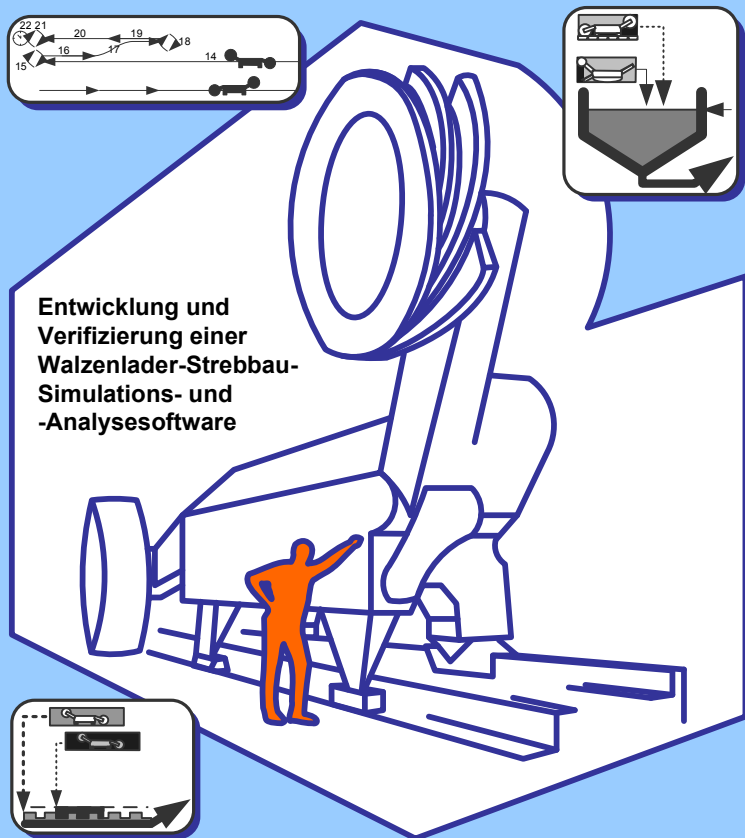


Walzenlader-Strebbau-Simulation

von U. Lange



BGMR

Lehr- und Forschungsgebiet Betriebsmittel für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe

Walzenlader-Strebbau-Simulation

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Ulrich Lange

aus Mechernich / Eifel

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2009

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

FAKULTÄT FÜR GEORESSOURCEN UND MATERIALTECHNIK DER
RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius

BGMR – Lehr- und Forschungsgebiet Betriebsmittel für die Gewinnung
mineralischer Rohstoffe

Lochnerstraße 4-20 Haus A • D-52064 Aachen

Tel.: +49 241 809 5680 • Fax: +49 241 809 2311

Internet: <http://www.bgmr.rwth-aachen.de> • E-Mail: info@bgmr.rwth-aachen.de

© 2009 Ulrich Lange

Druck:

Druckservice Zillekens

Am Bachpütz 4; 52224 Stolberg

Telefon 02408. 958216; Telefax 02408. 958217

E-Mail: info@druckservice-zillekens.de

Danksagung

Das Zusammenleben mit einem Bergingenieur ist nicht einfach. Deshalb danke ich allen voran meiner Verlobten, PKin Martina, dafür, dass sie es so lange mit mir aushielt und dass sie die mit der folgenden Arbeit einhergegangenen Belastungen nicht an unsere Beziehung herankommen ließ. Sie kocht den besten Kaffee im gesamten Aachener Revier, mit dem sie mich dopte, wann immer in mir das Bedürfnis nach Aufputschmitteln während des nächtlichen Langstrecken-Schreibens hochkam.

Wie schlimm muss das für „unvorbelastete“ Eltern in Deutschland sein, wenn der eigene Sohn sich outet, Bergbau studieren zu wollen? Ich danke Mama und Papa dafür, dass sie zu den wenigen Personen aus meinem Umfeld gehören, die mir diese Frage nie stellten: „Hat das überhaupt noch Zukunft?“ Stattdessen glaubten sie an mich, bestärkten mich in meinem Tun und unterstützten mich auch materiell in erheblichem Maße. Seit der dritten Schulklasse kontrollierten sie nicht mehr meine Hausaufgaben. Mit dieser Arbeit war es dann wieder so weit.

Es ist eine hohe Kunst, Kritik so anzubringen, dass der Kritiknehmer nicht die Freundschaft zum Kritikgeber aufkündigen möchte. Ich danke Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Arne Kristoffer für die konstruktive Kritik an meiner Arbeit und die vielen Fachgespräche, die er mit mir führte. Sein Elan und seine Begeisterung für den Bergbau im Allgemeinen sind erfrischend. Ebenso danke ich meinem ehemaligen WG-Kollegen Dipl.-Ing. Erik, designierter Dr.-Ing., für seine hilfreichen Hinweise zum wissenschaftlichen Schreiben, für seine mitreißende Begeisterung für große Bergbaumaschinen und für seine konstruktive Kritik, jedoch mit einer Einschränkung: „Du hast von Kohle keine Ahnung“, das hätte wirklich nicht sein müssen!

Gemeinsam sind wir stark! Ich danke dem gesamten Team vom BGMR, die mich bei meinem Werdegang an der Hochschule, im Besonderen bei der Erstellung dieser Arbeit und der Bearbeitung der Industrieprojekte tatkräftig unterstützten: MATA Fabian für die vielen „VBA-Orgien“, Renate als effektive „Firewall“ gegen „Verwaltungsspicken“, Ing. Jürgen und Dr.-Ing. Thomas als „Rettungsschwimmer“ im „Computer-Pool“, die hilfsbereiten und fleißigen HiWis, MATAs und WiMas für Kuchen, Eis und vor allem die freundlichen Worte in Büro und Küche.

Ich danke Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius dafür, dass er sich als Bericht dieser Arbeit ohne Zögern zur Verfügung stellte und mit mir erneut in die Diskussion ging. Offensichtlich war unser früheres „Aufeinandertreffen“ – er als Prüfungsausschussvorsitzender, ich als Studienberater – nicht zu abschreckend.

Abschließend gebührt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus, der mich zwar fordernd, aber respektvoll und motivierend dahin brachte, wo ich heute stehe. Er war wie ein Kapitän zu mir, der mich an langer Leine durchs kalte Wasser zog, mich dort austoben ließ, und immer wenn nötig ein Überlebenspaket zuwarf bzw. sogar das ganze Boot stoppte. Ich danke für die dargebrachten Möglichkeiten, die eingeräumten Freiheiten, die anregenden fachlichen und nichtfachlichen Diskussionen und seine permanente Bereitschaft, mir Dinge zu erklären, die ich eigentlich schon hätte wissen müssen.

*„Einer der Hauptnachteile mancher Bücher ist
die zu große Entfernung zwischen Titel- u. Rückseite.“*

Robert Lembke (1913-1989), deutscher Journalist und Fernsehmoderator

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zukunft der Kohle und der Hochleistungsstreibetriebe	3
1.2.1	Herkunft und Eigenschaften der Kohle.....	4
1.2.2	Kohle als zunehmend wichtiger Energieträger	5
1.2.3	Weltweite Kohleförderung	8
1.2.4	Reserven und Ressourcen der Kohle	9
1.2.5	Untertägiger Abbau von Kohle	12
1.2.6	Arbeitssicherheit beim untertägigen Abbau von Kohle	17
1.2.7	Produktivität beim Abbau von Kohle	18
1.3	Plädoyer für die Kohle und den StREBBau.....	19
2	Systembeschreibung	21
2.1	Langfrontartige Abbauweise.....	21
2.2	Betriebsmittel im Streb	25
2.2.1	Walzenlader.....	25
2.2.2	Förderer, Abfördersystem	27
2.2.3	Schildausbau	28
2.3	Verfahrenstechnik	30
2.3.1	Klassifizierung der Schnittverfahren.....	31
2.3.2	Bi-direktionale Methode	33
2.3.3	Uni-direktionales Schnittverfahren	37
2.3.4	Teilschnittverfahren	39
2.3.5	Teilöffnungsverfahren	41
2.3.6	Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren	43
2.4	Walzenlader-Schnittverfahren im Vergleich	46
3	Struktur und Realisierung der StREBBau-Simulation	49
3.1	Allgemeiner Algorithmus für StREBBau mittels Walzenlader	49
3.1.1	Manuelle Begrenzung der Marschgeschwindigkeit	52
3.1.2	Schneidmotorleistung	52
3.1.3	Leistung der Windenmotoren	53
3.1.4	Größe des Tunnelquerschnitts.....	54
3.1.5	Beladungsquerschnitt des StREBBförderers	55
3.1.6	Abförderkapazität nachgeschalteter Fördermittel.....	55
3.1.7	Gesamte installierte Motorleistung des StREBBförderers.....	56

3.1.8	Kapazitätsberechnung auf Stundenbasis	60
3.1.9	Kapazitätsberechnung auf Jahresbasis	61
3.1.10	Anwendungen des Algorithmus	61
3.2	Darstellung von Massenströmen	62
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise der Massenstromberechnung und Bunkersimulation	63
3.3	Simulation eines zweiten, gleichzeitig laufenden Abbaubetriebs	68
3.4	Umsetzung des Algorithmus in Excel	73
4	Berechnung eines Beispiel-Strebs	77
4.1	Kapazität in Abhängigkeit der Streblänge	78
4.2	Abgeleitete allgemeingültige Aussagen zur Strebplanung	79
5	Kalibrierung und Verifizierung der Strebbausimulation in der Praxis	81
5.1	Ort und Art der Kalibrierung und Verifizierung	81
5.2	Überprüfung des Schnittverfahrens und der automatisch aufgezeichneten Daten	82
5.3	Bestimmung strebspezifischer Werte zur Kalibrierung des Simulationsalgorithmus	83
5.3.1	Volumenbezogene Schneid- und Ladearbeit	83
5.3.2	Nötige Andruckkräfte	86
5.3.3	Bewegungswiderstände des Förderers	86
5.4	Kohlenmenge pro Gewinnungsfahrt und Walzenladerposition	89
5.4.1	Maximale, durchschnittliche und minimale Kohlenmenge pro Walzenladerdurchfahrt	89
5.4.2	Walzenladerbewegung	90
6	Diskussion der Strebbausimulation	93
6.1	Bewertung der Strebbausimulation	93
6.2	Das Fazit zur Strebbausimulation	97
7	Ausblick	99
7.1	Ausblick für den Berechnungsalgorithmus	99
7.1.1	Objektorientierte Programmierung als neue Basis	99
7.1.2	Erweiterungspotenzial des Algorithmus	100

8 Zusammenfassung.....	103
Bergmanns-Glossar	107
Abkürzungsverzeichnis	111
Abbildungsverzeichnis	113
Tabellenverzeichnis	117
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	119

Anhang

- A1 Definitionen: Reserve, Ressource und Lebensdauer**
- A2 Hartkohleförderung 2006**
- A3 Eingabemasken des Programms**
- A4 Aufbau und Funktionsweise des Plausibilitätschecks**
- A5 Beispielszenario Bunkersimulation**
- A6 Aufbau und Datenfluss des MSLM**
- A7 Beispielszenario zweier Strebbetriebe**
- A8 Berechnung des Mitschnitts in der selektiven Gewinnung von Kalisalz**
- A9 Kurven von Messdaten für die Kalibrierung und Verifizierung**
- A10 Kenndaten eines 1.250 hp Motors**

*„Bergbau ist nicht eines Mannes Sache.
Viele Räder greifen ineinander.
Doch es braucht ein Schwungrad.“*

Hans-Joachim Hartwig,
Geschäftsführer der Gesellschaft zur Verwahrung und
Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH

1 Einleitung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die Simulation von mechanisiertem Hochleistungs-Strebbau. Der Strebbau ist eine untertägig angewandte bergmännische Abbaumethode, die weltweit hauptsächlich bei der Gewinnung von Kohle zum Einsatz kommt. Wenn für die schneidende Gewinnung Walzenlader eingesetzt werden, spricht man vom Walzenlader-Strebbau.

Eine Simulation ist im Allgemeinen ein Gerät oder eine Software „zur Lösung ganz bestimmter physikalischer Probleme durch genaue Nachbildung des physikalischen Sachverhalts“ [LINGEN_1979, Nr.17, S.69f]¹. In diesem Fall bedeutet die Simulation eine intelligente Verknüpfung von physikalischen Gleichungen, die jeweils Teilaspekte im Gesamtsystem abbilden, so dass das Zusammenspiel der Gleichungen bei Eingabe von realistischen Werten zu verlässlichen Berechnungsergebnissen führt. Das Ziel der Simulation eines bergmännischen Abbaubetriebs ist eine Steigerung der Systemleistung durch veränderte Parameter, welche vorab auf ihren Einfluss auf das Produktionsergebnis getestet wurden.

Die Einleitung in Kapitel 1 legt die Motivation dar, warum das vorliegende Thema bearbeitet wurde, und liefert anschließend als Begründung einen Überblick über die weltweite Kohleförderung im Jahr 2006 zusammen mit einer Analyse der Rolle des Strebbaus in diesem Markt. Das Kapitel 2 beschreibt das System des Strebbaus, indem es auf seine Einsatzgebiete eingeht, ihn von anderen Abbaumethoden abgrenzt und sowohl die beteiligten Maschinenkomponenten vorstellt als auch die angewandte Verfahrenstechnik beschreibt, neu klassifiziert und miteinander vergleicht. In Kapitel 3 wird die Struktur des im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Simulationsalgorithmus und ansatzweise die Umsetzung in der Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel² vorgestellt. Kapitel 4 präsentiert ein Beispielszenario für die Anwendung der Simulation, in dem die Entwicklung der Gewinnungskapazitäten verschiedener Schnitt-

¹ Verweis auf Literatur- und Quellenverzeichnis am Ende

² Im Folgenden nur noch Excel genannt. In dieser Dissertation werden bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen nicht erwähnt. Wenn ein solcher Hinweis fehlt, dann bedeutet das nicht, dass eine Ware oder Warenname nicht geschützt ist.

verfahren über ansteigende Streblängen betrachtet und interpretiert wird. Die Kalibrierung und Verifizierung der entwickelten Strebbausimulation in einem nordamerikanischen Hochleistungsstreb ist in Kapitel 5 thematisiert. In Kapitel 6 wird der Algorithmus kritisch diskutiert und bewertet, bevor Kapitel 7 den Ausblick auf mögliche weitere Forschungs- und Entwicklungsleistungen auf diesem Gebiet aufzeigt und Kapitel 8 die Arbeit zusammenfasst.

1.1 Motivation

Generell ist eine Planung mit Zielvorgaben ein wichtiger Bestandteil von so komplexen Tätigkeiten wie die Kohlegewinnung im Strebbau³. Eine Zielvorgabe ist z. B. eine abgebaute Menge an Wertmineralen pro Jahr, die ein Betrieb erbringen muss, damit er erfolgreich arbeitet. Die Detailstufe, inwieweit diese Zielvorgabe auf Einzeltätigkeiten aufgegliedert wird, ist beliebig. Durch den ständigen Abgleich von gemessenen, momentan auftretenden Werten mit den abgeleiteten Teil-Zielvorgaben, ist das Aufsicht führende Personal frühzeitig in der Lage, eine Fehlentwicklung aufzudecken, so dass Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können, um die Zielvorgabe zu erreichen.

Bei der Planung eines Abbaubetriebs ist von zwei unterschiedlichen Standpunkten auszugehen, wie das folgende Beispiel verdeutlicht: Wenn die maximale Geschwindigkeit einer Maschine bekannt ist, kann daraus eine prognostizierte Jahresfördermenge bzw. ein Erlös für diese Menge auf dem Markt errechnet werden. Ist hingegen ein mindestens zu erbringender Erlös bzw. eine Jahresförderung vorgeschrieben, dann kann eine erforderliche Maschinengeschwindigkeit kalkuliert werden. Im Strebbau sind derartige Berechnungen komplex und umfangreich, insbesondere dann, wenn mehrere Verfahrenstechniken zum Vergleich anstehen. Deshalb ist die Notwendigkeit einer Simulation gegeben, die schnelle und verlässliche Ergebnisse liefert, und die dadurch das Planen und Analysieren vieler Szenarien ermöglicht. Sie spart den Planungsingenieuren⁴ Zeit und gibt Sicherheit bei Entscheidungsprozessen.

Weil es bis jetzt weltweit keine Strebbausimulation gibt, die alle gängigen Schnittverfahren mit einer hohen Detailstufe abbildet, wurde dieser Algorithmus entwickelt. Erste Ansätze des vorliegenden Simulationskonzepts gehen auf Forschungsarbeiten von BAYER zur Kapazitätsplanung einer anderen Abbaumethode aus dem Jahr 2000 [BAYER_2000] zurück. Danach verwendete BUSSMANN ein Grundgerüst einer Walzenlader-Simulation in einer Veröffentlichung über die Gewinnung niedriger Flözmäch-

³ Die Systembeschreibung des Strebbaus findet in Kapitel 2 statt.

⁴ In der vorliegenden Arbeit werden wegen der einfacheren Lesbarkeit ausschließlich die männlichen Formen verwendet, was keinesfalls eine Geringschätzung der Kolleginnen darstellt.

tigkeiten im Jahr 2001 [BUSSMANN_2001]. Seit 2004 begann die Entwicklung dieses Algorithmus in Zusammenarbeit mit internationalen Bergbaubetreibern. Strebbau-Studien inklusive Kapazitätsplanung und Engpassanalyse wurden im Jahr 2005 durchgeführt, wonach das nächste Teilprojekt startete, um das Planungstool inhaltlich zu erweitern und in der Bedienung zu verbessern. In 2006/2007 entstanden intuitive Ein- und Ausgabemasken und eine Simulationserweiterung, die die Massenströme aus dem Abbau abbildet. Nach erfolgreichem Abschluss dieses Teilprojekts Mitte 2007 wurde der Algorithmus um einen zweiten Abbaubetrieb ergänzt, wodurch das Zusammenspiel von zwei parallel arbeitenden Maschinen und deren Einfluss aufeinander analysiert und geplant werden kann. Dieses letzte Teilprojekt schloss mit der Einführung der Simulation beim Kunden und Berechnung verschiedener Szenarien im Juli 2008 erfolgreich ab.

1.2 Zukunft der Kohle und der Hochleistungsstreibetriebe

Kohle wird im Bergbau gewonnen und ist einer der wichtigsten Energieträger der heutigen Zeit. In Deutschland wird in den Massenmedien häufig der allgemeine Begriff Bergbau als Synonym für den subventionierten, deutschen Steinkohlenbergbau verwendet, weshalb vielfach eine falsche Vorstellung von der Situation der Rohstoffindustrie im Allgemeinen und von der Steinkohlegewinnung im Speziellen existiert.

Weil in Deutschland die Kohle – besonders die Steinkohle – eine spezielle Aufmerksamkeit genießt, geht dieses Unterkapitel auf die Zukunft der Kohle ein, indem es zuerst die Genese von Kohle sowie ihre Eigenschaften beschreibt, die sie von anderen fossilen Energieträgern unterscheidet. Anschließend wird die Bedeutung der Kohle anhand ihres entscheidenden Anteils am weltweiten Energieverbrauch verdeutlicht. Die Voraussage über die Entwicklung der Kohleförderung leitet sich von dem prognostizierten Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs ab. Das Kapitel gibt im Weiteren einen Überblick über das Angebot der wichtigsten Kohle fördernden Länder des Jahres 2006 unter besonderer Berücksichtigung der untertägigen Gewinnung, sowie einen Einblick in die Verfügbarkeit von Kohle anhand der Reserven- und Ressourcenangaben des gleichen Jahres. Abschließend wird der Trend hin zum untertägigen Strebbau mit mechanisierten Hochleistungsstreben hergeleitet, um die Bedeutung der Aufgabenstellung und die Zukunftsaussichten der Strebbausimulation zu unterstreichen.

1.2.1 Herkunft und Eigenschaften der Kohle

Kohle gehört zu den fossilen Energieträgern wie u. a. Erdöl und Erdgas. Sie entstehen durch die Zersetzung abgestorbener Flora und Fauna unter Sauerstoffabschluss, hohen Temperaturen und hohem Druck. Speziell die Kohle bildet sich aus abgestorbener Vegetation, die in Sümpfen und Mooren abgelagert wird. Durch Sedimentationsprozesse und Bewegungen der Erdkruste gelangen diese Ablagerungen in Teufen, in denen die genannten Einflüsse das organische Material chemisch und physikalisch verändern. Kohle ist demnach ein sedimentäres Gestein organischen Ursprungs [WCI_2005].

Nach der Ablagerung bildet sich durch die äußeren Einflüsse zuerst Torf, dann Braunkohle, Steinkohle und zuletzt Anthrazit. Verdichtet liegt das Material in Flözen mit einer Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis mehreren Dutzend Metern in der Erdkruste vor. Diese Flöze können heute sowohl horizontal gelagert als auch durch Gebirgsbewegung aufgefaltet und verworfen sein. Beispiele von flachen Kohleschichten finden sich im nordamerikanischen Appalachenrevier, wohingegen das deutsche Ruhrrevier stark tektonisch beansprucht wurde.

Die Kohle besitzt gegenüber anderen Energieträgern Vorteile bzgl. der Versorgungssicherheit, der Handhabbarkeit und der Einsatzmöglichkeiten. Kohle kommt auf jedem Kontinent und insgesamt in mehr als 70 Ländern vor. Diese vielen Förderstandorte verringern die Gefahr, dass wenige Länder den Markt beherrschen, wie es bei Öl oder Gas der Fall ist. Zwar kommt 55 %⁵ der Förderung aus Ländern mit „staatlich gelenkter Kohlewirtschaft“ [REMPEL et al._2007] wie China, Indien und Polen, andererseits verteilen sich die derzeit gewinnbaren Vorkommen auf Länder unterschiedlicher politischer Systeme und Bündnisse. Eine politisch motivierte Blockbildung und damit eine Steuerung des Kohlemarkts durch wenige Länder sind in absehbarer Zukunft unwahrscheinlich.

Kohle ist ein Massengut. Im Gegensatz zu anderen Energieträgern weist Kohle den Vorteil auf, dass sie aus technischer Sicht einfach zu transportieren ist. Bei Steinkohle findet der Transport hauptsächlich per LKW, Bahn und Schiff statt. Braunkohle wird wegen des hohen Wassergehalts in der Regel per Bandanlage über kurze Distanzen transportiert und dann gewinnungsnah verstromt.

Der Nachteil ist, dass Transportmittel und Umschlagplätze wie Zugverbindungen oder Schiffsverladeeinrichtungen nur begrenzte Kapazitäten haben. Bei einer Steigerung der Förderung aufgrund gestiegener Nachfrage ist es in der Vergangenheit vorgekom-

⁵ Prozentangaben sind z.T. gerundet, so dass Summen geringfügig von 100% abweichen können.

men, dass Transport- und Umschlagseinrichtungen an ihre Grenzen stießen [WÄLTERLIN_2008]. Derartige Probleme sind nur mittel- und langfristig durch die Erweiterung von Transport- und Umschlagskapazitäten zu lösen.

Im Gegensatz zu Öl und Gas, wo ggf. aus politischen und wirtschaftlichen Gründen eine Sicherung gegen Sabotage von Pipelines teilweise notwendig erscheint [REUTERS_2008; DW_2008], ist derzeit bei der Kohle kein besonderer Schutz der landbasierten Transportrouten erforderlich.

Kohle eignet sich gut zur Lagerung, so dass sie bei Bedarf abgerufen und eingesetzt werden kann. Die erneuerbaren Energien wie Solar- und Windenergie sind nicht jederzeit verfügbar. Solange die daraus gewonnene Energie nicht effektiv gespeichert und aktiviert werden kann, können sie die Kohle oder andere Energieträger nicht vollständig ersetzen.

Kohle ist vielfältig einsetzbar. Hauptsächlich wird sie als fester Brennstoff für die Stromerzeugung oder als Koks in der Stahlproduktion verwendet. Daneben kann sie aber auch verflüssigt [NIEHÖRSTER_2005; RITSCHEL et al._2007] oder zu Gas umgewandelt werden [KEMPKA et al._2008], eine Eigenschaft, die sie unter technischen Gesichtspunkten als Treibstoff für den Materialtransport und die Personenbeförderung qualifiziert.

1.2.2 Kohle als zunehmend wichtiger Energieträger

Kohle ist ein entscheidender Baustein im weltweiten Energiemix. In den meisten Industrienationen bildeten und bilden heute noch fossile Energieträger eine Grundvoraussetzung für die Industrialisierung. Der Primärenergieverbrauch (PEV) stieg in den letzten 30 Jahren um mehr als 70 % an [REMPEL et al._2007]. Im Jahr 2005 lag er bei 11.435 Mio. toe (tonnes oil equivalent). Der Anteil der fossilen Energieträger betrug dabei ca. 81 %. Kohle nahm mit ca. 25 % die zweitwichtigste Rolle nach dem Öl mit ca. 35 % ein. Das Gas stand mit ca. 21 % an dritter Position, gefolgt von Biomasse und Abfall mit ca. 10 %. Den Rest bildeten Kernkraft mit ca. 6 %, Wasserkraft mit ca. 2 % und andere Energiequellen mit ca. 1 %. Abbildung 1-1 veranschaulicht sowohl den insgesamt angestiegenen PEV seit dem Jahr 1971 bis zum Jahr 2005, als auch den nach der Jahrtausendwende zunehmenden Anteil der Kohle am weltweiten Energieverbrauch.

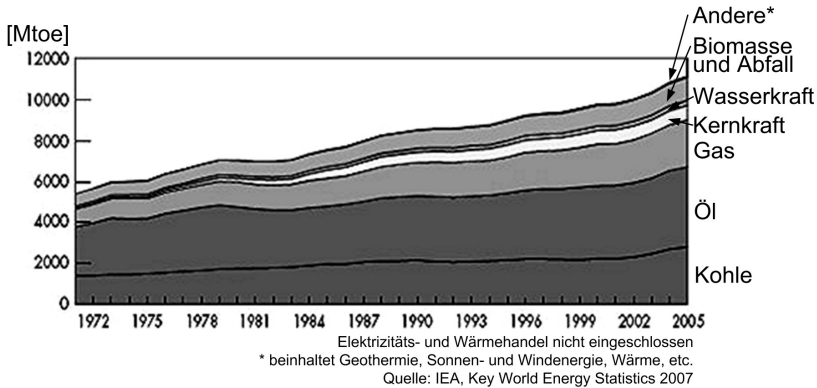


Abbildung 1-1: Entwicklung des PEV von 1971 bis 2005 nach Anteilen der Energieträger

Der weltweite PEV wird von der International Energy Agency (IEA) im World Energy Outlook (WEO) 2006 für das Jahr 2030 auf ca. 17.100 Mio. toe prognostiziert (Abbildung 1-2). Das entspricht einer Gesamtsteigerung des Energieverbrauchs gegenüber 2006 von 53 % oder einer durchschnittlichen jährlichen Steigerung von 1,6 % in den nächsten 24 Jahren.

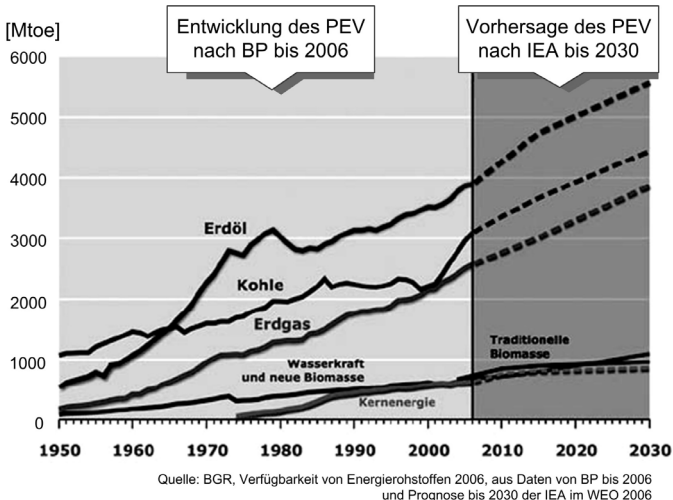


Abbildung 1-2: Entwicklung und Prognose des PEV von 1950 bis 2030

Wegen des hohen Anteils an der Strom- und Stahlerzeugung wird der Kohle aufgrund der sich noch im Wachstum befindlichen Strom- und Stahlmärkte – besonders in China

und Indien – ein zunehmend stärkeres Gewicht im steigenden Energiebedarf vorausgesetzt. Es ist danach laut IEA eine durchschnittliche jährliche Steigerung des Kohleverbrauchs von 1,8 % bis ins Jahr 2030 zu erwarten [IEA_2006].

Kohle besitzt weltweit einen durchschnittlichen Anteil von ca. 40 % an der Stromerzeugung [WCI_2006]. Den steigenden Strombedarf verdeutlicht das World Coal Institute (WCI) nach Daten der IEA aus dem Jahr 2004 mit der Anzahl der Menschen ohne Zugang zur Elektrizität in Schwellen- und Entwicklungsländern (Abbildung 1-3). Der Status des Jahres 2002 steht dabei im Vergleich zur Prognose für das Jahr 2030. Es wird vorhergesagt, dass in den folgenden 28 Jahren im asiatischen Raum die Anzahl an Menschen ohne Stromversorgung von ca. 221 auf 98 Mio., im vorderasiatischen Raum von ca. 798 auf 683 Mio., in Südamerika von ca. 46 auf 21 Mio. und im arabischen und nordafrikanischen Raum von ca. 23 auf 6 Mio. sinkt. Nur im mittleren und südlichen Teil Afrikas wird eine rückläufige Versorgung von ca. 526 auf 584 Mio. Menschen angenommen. Ob das Bevölkerungswachstum eingerechnet ist, wird aus der Quelle nicht ersichtlich. Wenn man das Bevölkerungswachstum in den genannten Regionen vernachlässigt, steigt alleine nach dieser Vorhersage die Zahl der Menschen mit Elektrizitätsversorgung um ca. 222 Mio. an. Der tatsächliche Wert dürfte unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums noch höher liegen.

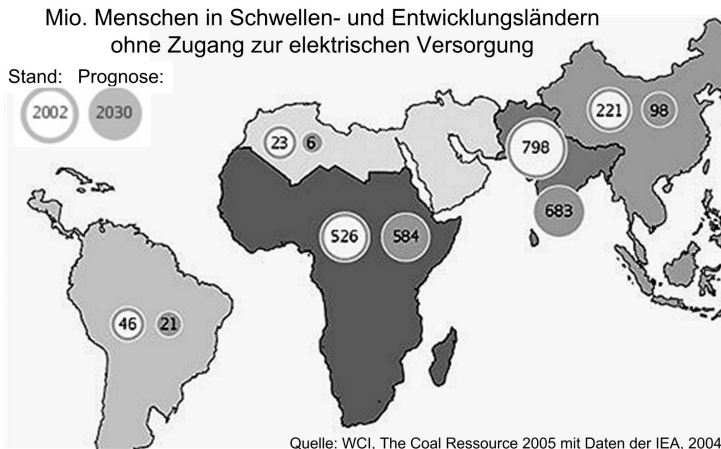


Abbildung 1-3: Prognosen für 2030 der im Wachstum befindlichen Strommärkte in den Schwellen- und Entwicklungsländern

Zudem hat die Kohle einen entscheidenden Anteil an der Stahlerzeugung. Laut WCI wird in ca. 70 % der weltweiten Stahlproduktion eine besondere Kohlenqualität, die Koks-kohle, eingesetzt. Die restliche Stahlproduktion geschieht durch Einschmelzen von recyceltem Schrott u. a. in Elektroöfen, die ihren Strom neben anderen Energielieferanten aus Kohlekraftwerken beziehen [WCI_2007].

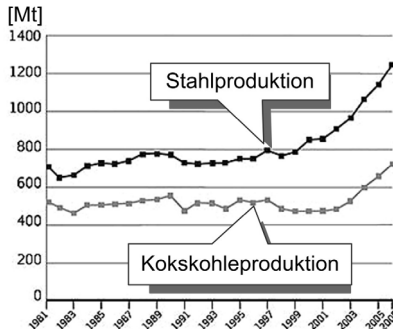


Abbildung 1-4: Globale Produktion von Stahl und Kokskohle zwischen 1981 und 2006

Den steigenden Bedarf an Stahl und damit an Kohle für die Stahlerzeugung zeigt Abbildung 1-4. Nach Angaben des WCI, gestützt auf Daten der IEA und des International Iron and Steel Institute (IISI) hat sich in den letzten 35 Jahren die Stahlproduktion mehr als verdoppelt: Von weniger als 600 Mio. t im Jahr 1970 wuchs sie auf über 1,2 Mrd. t in 2006 an. Der überdurchschnittliche Anstieg der Produktion nach der Jahrtausendwende ist laut WCI besonders auf die starken Wirtschaftswachstumsraten in China (11 % in 2006) und Indien (9 % in 2006) zurückzuführen. Zusammen haben beide Länder in 2006 ca. 40 % des weltweit produzierten Stahls gebraucht. Diese steigende Entwicklung wird als anhaltend bewertet, da sich die Bevölkerungszahlen in den beiden Ländern weiterhin im Wachstum befinden [WCI_2007].

1.2.3 Weltweite Kohleförderung

Die Angaben über die weltweite Kohleförderung sowie die Reserven und Ressourcen sind dem Kurzbericht „Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2006“ von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) entnommen. Die BGR differenziert zwischen Hartkohle und Weichbraunkohle, wobei der Begriff Hartkohle die Qualitäten Anthrazit, Steinkohle und Hartbraunkohle vereint, deren Energiegehalte der Rohkohle (aschefrei) über 16.500 kJ/kg liegen. In der vorliegenden Arbeit wird im Weiteren der Begriff Hartkohle gemäß der Definition der BGR verwendet.

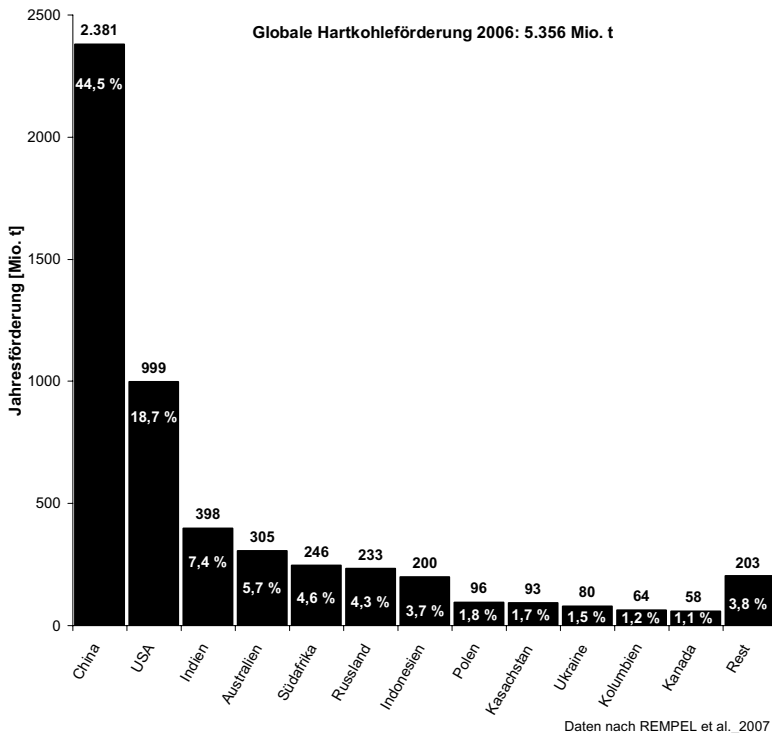


Abbildung 1-5: Globale Hartkohleförderung 2006 und ihre Hauptförderländer

Die Gesamtkohleförderung betrug im Jahr 2006 ca. 6.323 Mio. t. Mit 5.356 Mio. t hält die Hartkohle einen Anteil von 84,7 % [REMPEL et al._2007]. Die zwölf Hauptförderländer produzierten im Jahr 2006 mehr als 96 % der weltweit gewonnenen Hartkohle (Abbildung 1-5). Zu ihnen zählen hier die Länder, deren Fördermenge jeweils größer als 1 % der Gesamtfördermenge ist. Alle weiteren Förderländer werden zum Rest zusammengefasst. Den mit Abstand größten Anteil von knapp der Hälfte der Gesamtförderung hat China mit 2.381 Mio. t. Die USA produzierten weniger als ein Fünftel mit 999 Mio. t, gefolgt von Indien mit 398 Mio. t und Australien mit 305 Mio. t. Gemeinsam förderten diese vier Länder mehr als drei Viertel der weltweiten Menge.

1.2.4 Reserven und Ressourcen der Kohle

„Bauwürdige“ Reserven sind die Vorkommen an Rohstoffen, die technisch und wirtschaftlich unter dem gerade herrschenden Marktumfeld gewinnbar sind [REUTHER et al._1989]. Der Quotient aus der Reservemenge und der aktuellen Jahresförderung gibt

die statische Lebensdauer der Reserve in Jahren an. Es ist zu beachten, dass die statische Lebensdauer nur eine Momentaufnahme darstellt und sich von Jahr zu Jahr verändert. Potentiell bauwürdige Ressourcen sind technisch, aber nicht wirtschaftlich abbaubare Vorkommen. Mit abnehmendem Informationsgehalt über ein Vorkommen wird von sicheren, wahrscheinlichen, möglichen oder prognostischen Ressourcen gesprochen [BARTHEL_1999]. Eine Definition der Begriffe Reserve, Ressource und Lebensdauer ist dem Anhang A1 zu entnehmen.

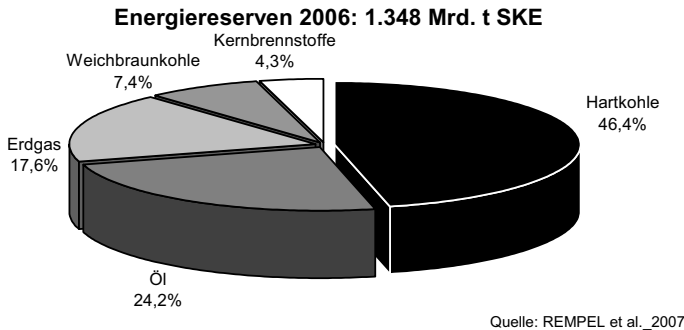
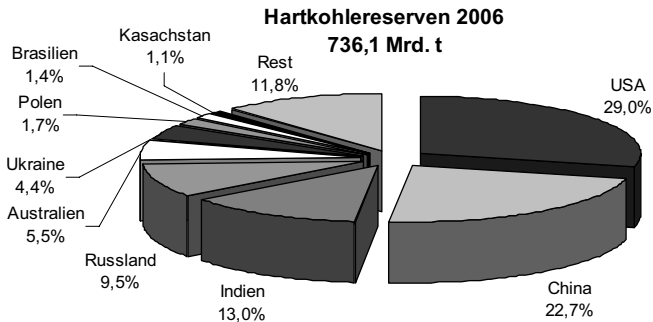


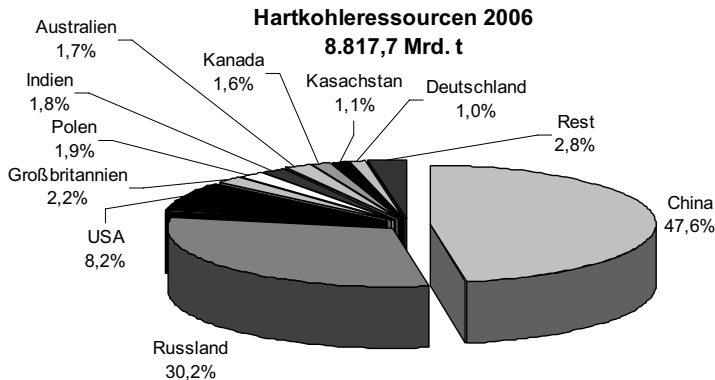
Abbildung 1-6: Anteile nicht erneuerbarer Energien an den Energiereserven 2006

Die Energiereserven nicht erneuerbarer Energien betrugen Ende 2006 ca. 1.348 Mrd. t Steinkohleeinheiten (SKE), was ca. 943,6 Mrd. toe entspricht. Die Hartkohle hat mit ca. 46,4 % daran den mit Abstand größten Anteil (Abbildung 1-6). Ihre Reserven belaufen sich auf ca. 736,1 Mrd. t. Mit der Fördermenge von 5.356 Mio. t im Jahr 2006 ergibt sich eine statische Lebensdauer von 137 Jahren. Unter Berücksichtigung steigender Förderzahlen und sich verändernder Reservemengen rechnet das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und das WCI mit einer weltweit durchschnittlichen dynamischen Lebensdauer der Hartkohle von 160-190 Jahren [BMWi_2008; WCI_2005].

In der Auflistung der Länder mit den größten Hartkohlereserven (Abbildung 1-7) zeigt sich die regionale Verteilung dieses Rohstoffs. Die neun Länder, deren jeweiliger Reserveanteil größer als ein Prozent ist, stellen zusammen über 88 % der Gesamtreserven. Die USA führen mit ca. 29,0 %, gefolgt von China mit ca. 22,7 %, Indien mit ca. 13,0 % und Russland mit ca. 9,5 %. Daraus ist ersichtlich, dass sich mehr als drei Viertel der Hartkohlereserven auf nur fünf Länder verteilen.



Quelle: REMPEL et al._2007

Abbildung 1-7: Länderanteile an den Hartkohlereserven 2006

Quelle: REMPEL et al._2007

Abbildung 1-8: Länderanteile an den Hartkohleressourcen 2006

Zum Schluss des Jahres 2006 weist die BGR eine weltweite Ressourcenmenge nicht erneuerbarer Energien von ca. 11.647 Mrd. t SKE (8.152,9 Mrd. toe) aus. Damit übertreffen die Ressourcen die Reservemenge um das 8-fache. Den dominierenden Anteil von ca. 65,3 % stellt die Hartkohle, das restliche Drittel teilen sich Erdgas mit ca. 19,4 %, Weichbraunkohle mit ca. 9,4 %, Erdöl mit ca. 4,1 % und Kernbrennstoffe mit ca. 1,8 %.

Die Menge der Hartkohleressourcen wird mit 8.817,7 Mrd. t angegeben. Das entspricht der 12-fachen Menge der Hartkohlereserven. Die Liste der Länder mit Ressourcen größer als ein Prozent der Gesamtmenge umfasst zehn Nationen (Abbildung 1-8),

wobei alleine die ersten fünf zusammen einen Anteil von ca. 90 % aufweisen. Eine besondere Aufmerksamkeit muss den ersten beiden Ländern geschenkt werden. China und Russland besitzen mit ca. 47,6 % bzw. ca. 30,2 % zusammen drei Viertel der globalen Hartkohleressourcen. Die USA stehen mit ca. 8,2 % an dritter Position, gefolgt von Großbritannien mit ca. 2,2 % und Polen mit ca. 1,9 %.

Die oben aufgeführten Statistiken legen nahe, dass die Hartkohle mit den größten Reserven und Ressourcen und mit der längsten Lebensdauer unter den nicht erneuerbaren Energieträgern die besten Zukunftsaussichten bietet. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, wie die Kohle abgebaut wird.

1.2.5 Untertägiger Abbau von Kohle

Der Abbau von Kohle geschieht durch das selektive Lösen des Wertminerals aus dem Gebirgsverband. In Abhängigkeit von geologischen, technischen und wirtschaftlichen Faktoren baut man entweder in einem Tagebau oder untertage in einem Bergwerk ab. Der weltweite durchschnittliche Anteil der untertage gewonnenen Kohle beträgt laut WCI ca. 60 % [WCI_2006]. Auch heute noch wird Kohle untertage manuell mit einfachen Werkzeugen und meist im Sprengbetrieb gelöst. Diese Methode ist zumeist gefährlich für die Gesundheit und das Leben der Bergleute und zudem wenig produktiv im Vergleich zu mechanisierten Bergwerken, bei denen zwei Abbaumethoden mit unterschiedlicher Maschinenteknik vorherrschen. Die erste Methode ist der Örterbau mittels Continuous Miner (CM) oder Bolter Miner. Zusätzlich zu den Arbeitsvorgängen Schneiden und Laden kann der Bolter Miner den Arbeitsvorgang des Sicherns mit einer Bohr- und Ankersetzvorrichtung durchführen, die der CM nicht besitzt (Abbildung 1-9). Ein zusätzlicher Bohr- und Ankerwagen übernimmt beim CM diesen Arbeitsvorgang.

1 Einleitung

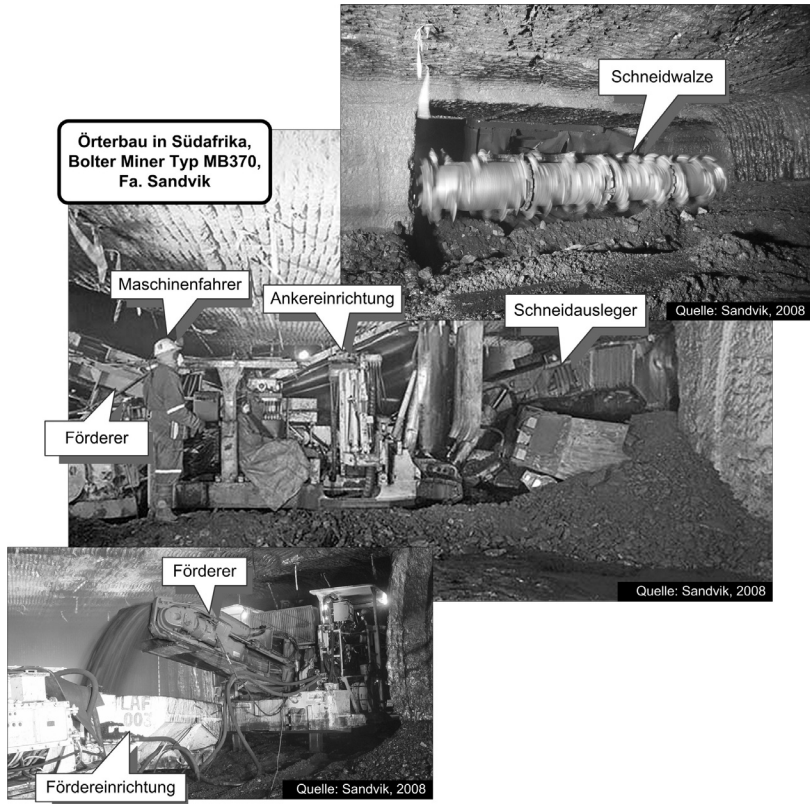


Abbildung 1-9: Örterbau mit Bolter Miner

Die Maschinen treiben schachtbrettmusterartig Strecken, die so genannten Örter, in das horizontal gelagerte Flöz. Zur Stützung des Hangenden bleiben Blöcke aus Kohle, genannt Festen, zwischen den aufgefahrenen Strecken stehen. Die Kohle, die vom CM gelöst und geladen wurde, transportieren diskontinuierliche oder kontinuierliche Fördermittel von der Gewinnungsmaschine zu einer zentral gelegenen Bandstraße, von wo aus sie nach über Tage durch Schacht- oder Bandförderanlagen zur Aufbereitung gelangt. Wird die verbliebene Kohle der Festen später hereingewonnen, spricht man von Örterbau mit Pfeilerrückgewinnung. Örterbau kann auch konventionell durch Bohren und Sprengen betrieben werden.

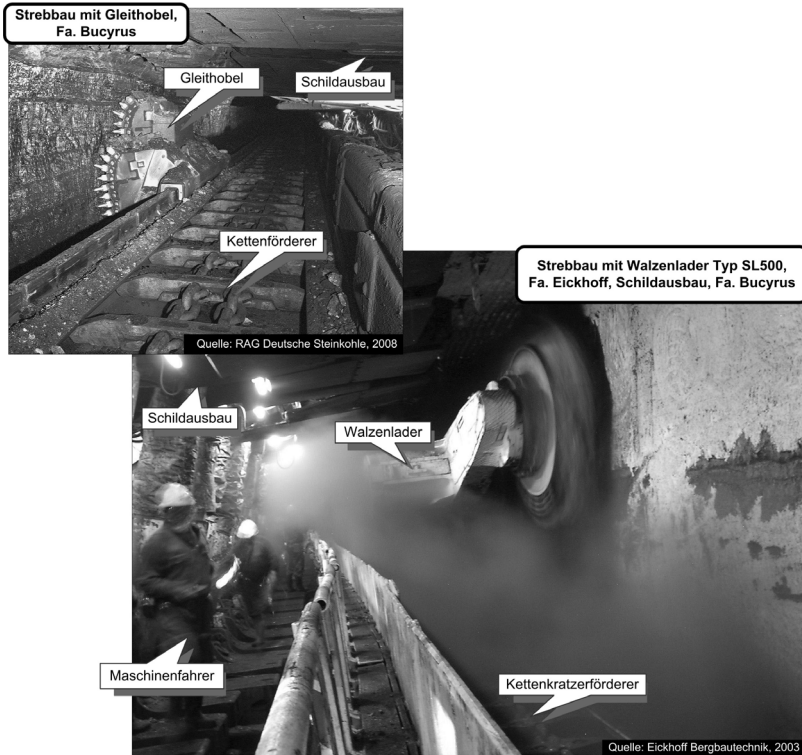
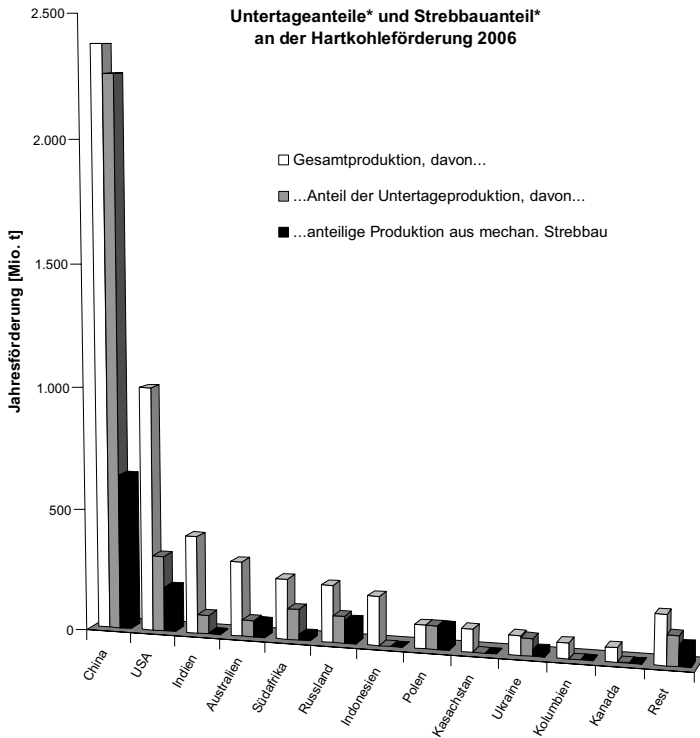


Abbildung 1-10: Strebbau mit Hobel und Walzenlader

Bei der zweiten Methode kommen zumeist CM in der Vorrichtung⁶ zum Einsatz. Es werden mehrere hundert Meter voneinander entfernte Strecken aufgefahren, zwischen denen der Strebbetrieb anschließend das Wertmineral abbaut. Walzenlader oder Hobel lösen entlang dieser langen Abbaufont das Material und laden dieses auf einen Kettenkratzerförderer (Abbildung 1-10), der gleichzeitig der Führung des Gewinnungsgeräts dient, während das Personal und die Betriebsmittel im Streb durch einen hydraulischen Schildausbau gesichert sind. Mit jeder Schnittiefe pro Fahrt rückt der Streb im Flöz vor. Die Kohle wird ab Strebende auf Bandanlagen übergeben und mit diesen oder mit Schachtförderanlagen nach übertage gefördert. Eine genauere Systembeschreibung des mechanisierten Hochleistungsstrebbaus, der im Folgenden nur noch Strebbau genannt wird, und der eingesetzten Betriebsmittel sowie der Verfahrenstechnik erfolgt in Kapitel 2.

1 Einleitung



* Zahlen basieren teilweise auf länderspezifischen Kohlenklassifizierungssystemen, Datentabelle mit Quellenangaben befindet sich im Anhang A2

Abbildung 1-11: Hauptförderländer von Hartkohle im Jahr 2006, Untertageanteile, Anteile mechanisierten Strebbaus

Die Verhältnisse von übertägig zu untertägig gewonnener Kohle und von Örtterbau zu Strebbetrieben sind länderspezifisch. Nicht immer sind die Gründe dafür in der Geologie oder bei der Technik zu finden, sondern teilweise spielen historische Hintergründe eine Rolle. Abbildung 1-11 veranschaulicht die Verhältnisse der über- und untertägig gewonnenen Kohlemengen innerhalb der zwölf wichtigsten Kohleförderländer und gibt den Masseanteil an, der aus Bergwerken mit mechanisiertem Strebbau kommt. Dazu ist erstens anzumerken, dass es sich besonders bei den Zahlen aus China zwar um mechanisierte Strebbetriebe, aber nicht immer um Hochleistungsstrebbetriebe handelt, zweitens sind in den Angaben auch die Förderzahlen der bergwerkseigenen Streckenvortriebe durch CM oder anderer Vortriebstechniken enthalten, deren Anteil etwa 9-

⁶ Auffahrung von Strecken als Vorbereitung zum StREBBau

15 % der Gesamtförderung beträgt [NIENHAUS et al._2002]. Eine Tabelle mit den Quellenangaben befindet sich im Anhang A2.

Hartkohle aus China kommt zu ca. 95 % aus untertägigem Abbau. In den USA wird weniger als ein Drittel und in Indien und Australien ungefähr ein Fünftel untertätig gewonnen. Die südafrikanische und russische Förderung teilt sich etwa zur Hälfte in über- und untertätig gewonnene Hartkohle auf. In Indonesien gibt es fast keinen untertätigen Abbau auf Hartkohle, während in Polen hingegen ungefähr die gesamte Hartkohle untertätig gewonnen wird.

Obwohl China mit Abstand die größte Förderung hat, kommt nur ca. ein Viertel aus Bergwerken mit mechanisierten Strebbetrieben, im Gegensatz zu den USA, wo die Fördermenge aus Bergwerken mit Strebbau bei mehr als der Hälfte liegt. In Indien konnte sich der moderne Strebbau bisher nicht etablieren. Versuche, ihn seit Mitte der 70er Jahre einzuführen, scheiterten vorerst [METHA et al._2003], so dass nun der Anteil der Strebbergwerke vernachlässigbar klein ist. Australien, Russland, Polen zeichnen sich dadurch aus, dass deren Untertageförderung zum Großteil aus Bergwerken mit Strebbetrieben stammt. In Südafrika ist das Verhältnis umgekehrt, weil die ungünstige Geologie eine Ausweitung des Strebbaus verhindert [RITSCHER et al._2007]. Noch weniger Strebbau gibt es in Indonesien, Kasachstan, Kolumbien und Kanada, wo nur wenige oder keine Bergwerke mit Strebbetrieben existieren. Die Informationen über die Ukraine sind lückenhaft. Wegen der teilweise sehr alten Bergwerke und der schwierigen Geologie [MMCS_2006] wird angenommen, dass nur ein Viertel der untertätig gewonnenen Menge aus mechanisierten Strebbetrieben kommt [RMG_2007].

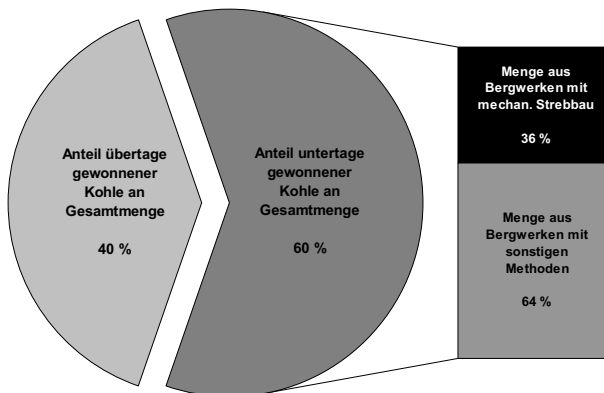


Abbildung 1-12: Hartkohleförderung 2006 nach Abbaumethode

Die zum Überblick zusammengefassten globalen Daten, dargestellt in Abbildung 1-12, ergeben zwischen über- und untertägig gewonnener Hartkohle ein ungefähres Verhältnis von eins zu zwei. Die ca. 3.239 Mio. t pro Jahr untertägig gewonnene Hartkohle kommt zu ca. einem Drittel aus Bergwerken mit mechanisiertem Strebbau und zu ca. zwei Dritteln aus Bergwerken mit anderen Abbaumethoden. Das bedeutet, dass weltweit ein Fünftel, ca. 1.207 Mio. t, der über- und untertägigen Hartkohleförderung aus Bergwerken mit Strebbau stammt.

1.2.6 Arbeitssicherheit beim untertägigen Abbau von Kohle

Die untertägige Kohlegewinnung birgt erhebliche Gefahren in sich. Die technischen und die Sicherheitsstandards sind in den Kohle fördernden Ländern sehr unterschiedlich, so dass es in den Ländern mit niedrigen Standards und mangelnder Bergaufsicht häufig zu Grubenunglücken von erheblichem Ausmaß kommt. Nicht selten sind dabei Dutzende Tote pro Unglück zu beklagen. Große Unglücke werden meist durch Methan- und Kohlenstaubexplosionen oder plötzliche Wassereinbrüche verursacht, wohingegen einzelne Todesfälle auf Einstürze und fehlerhaften Umgang mit der Maschinenteknik zurückzuführen sind. Häufig werden große Grubenunglücke aus China, Russland und der Ukraine gemeldet. Im Jahr 2004 sind alleine in China nach offiziellen Angaben 6.027 Bergleute bei der Arbeit verunglückt (5.986 in 2005), das entspricht einem Anteil von ca. 79 % aller Toten im weltweiten Kohlebergbau in 2004 [SCHMITT_2008]. Für China ergibt sich daraus eine Jahresquote von ca. 3,1 Toten/Mio. t geförderter Kohle [MJ_2005]. Dies ist ungefähr die Hälfte der Quote aus dem Jahr 1999 mit 6,08 Toten/Mio. t. Im Vergleich dazu gab es in den USA im Jahr 2006 bei strengen Auflagen durch die Gesetzgebung und hohen Sicherheitsstandards immer noch 47 Todesfälle im Kohlenbergbau (22 in 2005). Diese Zahlen führen zu einer fast 70-mal niedrigeren Quote von ca. 0,045 Toten/Mio. t [FREME_2007] gegenüber China. Von den 47 Todesfällen in den USA ist nur einer direkt mit der Abbaumethode des Strebbaus in Verbindung zu bringen⁷, wohingegen knapp zehn Unfälle dem Örterbau oder dem Streckenvortrieb zuzuordnen sind⁸ [MSHA_2006].

Der Zusammenhang zwischen der Abbaumethode und den damit verbundenen Risiken wird am Beispiel China besonders deutlich. Der Grund für die dortigen hohen Unfallzahlen sind die verwendeten Techniken und Methoden aufgrund der Besitzverhältnisse bzw. des Managements. In China gab es im Jahr 2005 ca. 24.000 Bergwerke. Davon waren ca. 3.000 Bergwerke im staatlichen Besitz mit zentraler Führung, welche häufig

⁷ Spontaner Kohleausbruch aus dem Stoß in den Fahrweg bis unter den Schildausbau

⁸ Nachfall aus dem Hangenden oder dem Stoß; Unfälle mit Betriebsmitteln, hauptsächlich Fahrzeugen

die Strebbbaumethode verwenden. Die restlichen ca. 21.000 Bergwerke befanden sich im Staatsbesitz unter provinzieller Führung oder im Privatbesitz und -führung mit dem traditionellen Kammer-Pfeiler-Bau.

Im Jahr 2003 lag die durchschnittliche Unfallquote Chinas bei 4,17 Toten/Mio. t geförderter Kohle. In den zentral geführten Betrieben mit vornehmlich Strebbau war die Unfallquote ungefähr viermal niedriger (1,08) als der Durchschnitt, in denen mit provinzieller Führung betrug sie drei Viertel des Durchschnitts (3,13), jedoch in den Privat- und Gemeindegruben gab es eine 2,3-fach höhere Unfallquote (9,62). China reagierte unter anderem auf diese hohen Unfallzahlen mit einem Fünfjahresplan, der die massive Reduzierung der Anzahl an Bergwerken zugunsten der sicheren Großbetriebe mit Strebbau auf ca. 10.000 vorsieht [SCHMITT_2008, S.4 ff]. Die verschiedenen Abbauethoden bedingen nicht nur ein unterschiedliches Sicherheitsniveau, sie unterscheiden sich auch in ihrer Produktivität.

1.2.7 Produktivität beim Abbau von Kohle

Der Aufwand beim Abbau von Kohle ist untertage größer als im Tagebau. Das Verhältnis der Produktivität bei Tagebauen zu untertägigen Bergwerken (Abbildung 1-13), gemessen in geförderter Menge in Short Tons pro Mannstunde (sht/Mh), betrug in den USA im Jahr 2007 mit Quoten von 10,23 sht/Mh im Tagebau und 3,36 sht/Mh untertage ca. drei zu eins [EIA_2008].

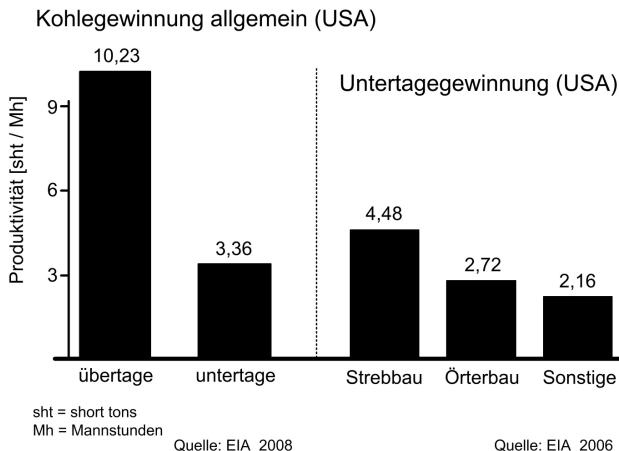


Abbildung 1-13: Durchschnittliche Produktivität nach Abbaumethode in den USA 2007

Von den untertägigen Abbaumethoden ist der Strebbau gemittelt die produktivste. Die EIA gibt für die USA an, dass im Strebbau durchschnittlich 4,48 sht/Mh gefördert wurden, während es im Örterbau nur 2,72 sht/Mh und mit anderen Methoden nur 2,16 sht/Mh sind. Damit ist die Produktivität im Strebbau zwischen 1,6- und 2,1-mal höher als bei den anderen Methoden [FREME_2007-2].

Betrachtet man die chinesischen Förderzahlen, dann wird deutlich, dass der Strebbau als produktivste Methode ein sehr großes Potential in diesem Land besitzt. Die Bandbreite der chinesischen Produktivität reicht von 200 bis 20.000 t geförderte Kohle pro Mannjahr (Ma), ihr Durchschnitt beträgt aber nur ca. 370 t/Ma. Die 3.000 staatlichen und damit produktiveren Bergwerke machen nur ca. 12,5 % der Bergwerke aus, sie sind aber für ca. 70 % der Förderung verantwortlich [SCHMITT_2008, S. 4ff]. Wenn der chinesische Fünfjahresplan erfüllt werden soll, müssen vermehrt produktivere Methoden eingesetzt werden, um auf eine geplante Gesamtförderung von 2,5 bis 2,7 Mrd. t Kohle bis zum Jahr 2010 zu gelangen. Im Vergleich zu China ist die durchschnittliche Produktivität untertägig gewonnener Kohle in Deutschland mit ca. 640 t/Ma 1,7-mal höher und in den USA beträgt sie fast das 18-fache mit ca. 6.600 t/Ma.

1.3 Plädoyer für die Kohle und den Strebbau

Die Kohle gehört zu den wichtigsten fossilen Energieträgern der heutigen Zeit. Sie ist einfach zu transportieren, gut zu deponieren und dadurch jederzeit bei Bedarf verfügbar. Im weltweiten PEV lag sie im Jahr 2005 mit einem Anteil von ca. einem Viertel an zweiter Stelle hinter dem Öl, welches etwas mehr als ein Drittel Anteil am Gesamtverbrauch hatte. Aufgrund eines vorhergesagten steigenden Bedarfs an Kohle in ihren Haupteinsatzgebieten Strom- und Stahlerzeugung, werden ihr höhere jahresdurchschnittliche Wachstumsraten als anderen Energieträgern prognostiziert, wonach der Verbrauch in den nächsten 24 Jahren um jährlich 1,8 % auf insgesamt ca. 4.500 Mio. toe im Jahr 2030 steigen soll.

Weltweit wurden 2006 ca. 5,3 Mrd. t Hartkohle gefördert, wovon ca. drei Viertel aus vier Ländern stammt. Darüber hinaus besitzt die Hartkohle mit knapp der Hälfte der Gesamtenergiereserven an nicht erneuerbarer Energien das größte Potenzial. Während Erdöl und Erdgas eine statische Lebensdauer von 40-60 Jahren haben, liegt sie bei der Kohle bei mehr als 130 Jahren.

1 Einleitung

Kohle wird ungefähr zu 40 % im Tagebau und zu ca. 60 % untertage in Bergwerken abgebaut. Die untertägigen Methoden sind der händische oder konventionelle⁹, wenig produktive aber gefährliche Kammer-Pfeiler-Bau, der Örterbau und der Strebbau, wobei das letztgenannte Verfahren das produktivste und sicherste von allen ist.

Im weltweiten Durchschnitt kommen von der untertägig gewonnen Kohle ca. ein Drittel aus Bergwerken mit Strebbetrieben, wobei nur ein Teil als Hochleistungsstriebe zu bezeichnen ist. Der Rest stammt aus Gruben mit den anderen Abbaumethoden. Durch den Trend zu mehr Sicherheit und höherer Produktivität im Abbau, hat die Abbaumethode des Hochleistungsstriebs gute Zukunftsaussichten. Das unterstreicht die Notwendigkeit, sich mit dem System Hochleistungsstriebe intensiv zu befassen und einen Simulationsalgorithmus zu entwickeln, welcher eine Hilfe zur Planung und Optimierung dieser Abbaumethode bietet.

*„Das System, das ein großer Mann erfunden hat,
können kleine verteidigen.“*

Jean Paul (1763-1825), deutscher Schriftsteller

⁹ Bohr- und Sprengarbeiten

2 Systembeschreibung

Dieses Kapitel behandelt das System des Strebbaus, indem es ihn zuerst von anderen Abbaumethoden abgrenzt und seinen Aufbau mit anschließender Beschreibung der beteiligten Betriebsmittel erklärt. Weil eine Klassifizierung und Nomenklatur der Schnittverfahren international noch nicht einheitlich geregelt ist, wird sie besonders berücksichtigt. Dies beinhaltet eine systematische Einteilung in Kategorien, gefolgt von Schilderungen ihrer Grundformen sowie ihrer Varianten und Benennungen.

Unterschiedliche Abbaufverfahren gibt es aufgrund der Vielseitigkeit von Lagerstätten. Sie sind nach GRUMBRECHT historisch gewachsene Methoden, die von der Lagerstätte selbst, den mit dem Abbau einhergehenden Erfahrungen, den geologischen, wirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen und dem Stand der Technik beeinflusst werden [GRUMBRECHT_1949, S.58]. So spielt z. B. der erzielbare Gewinn eine ebenso wichtige Rolle bei der Auswahl oder Entwicklung eines Abbaufverfahrens, wie die Standfestigkeit des Nebengesteins. In der heutigen Zeit werden juristische und ökologische Fragestellungen in diesem Zusammenhang zunehmend wichtiger.

2.1 Langfrontartige Abbauweise

Im deutschen Sprachgebrauch gibt es die Haupteinteilung der untertägigen Abbaufverfahren gemäß REUTHER in

- Bauweise
- Dachbehandlung
- Abbau- und Verhiebrichtung
- Abbauführung

Der Strebbau wird meistens bei flach gelagerten Flözen oder Teilen dieser angewendet, zuweilen kommt er auch auf bis zu 25 gon geneigten Schichten vor [REUTHER et al._1989, S.432ff]. Vorwiegend handelt es sich um den Abbau von

2 Systembeschreibung

Kohle, aber auch Kalisalz [LANGE_2007], Metallerz und Phosphate werden auf diese Weise gewonnen [REUTHER et al._1989, S. 432]. Abbildung 2-1 zeigt schematisch den Aufbau eines Kohlebergwerks mit Strebbau, in der zentral der Streb mit Walzenlader abgebildet ist. Daneben gibt es Strebe, in denen für die Gewinnung Hobel eingesetzt werden. Der bis zu ca. 500 m lange Streb [IM_2007] verbindet mindestens zwei wenige Kilometer lange, parallel aufgefahrenen Strecken, die ein Baufeld seitlich begrenzen. Entlang des Strebs findet der Lösevorgang des Minerals statt, daher wird er auch als „langfrontartige Abbauweise“¹⁰ bezeichnet.

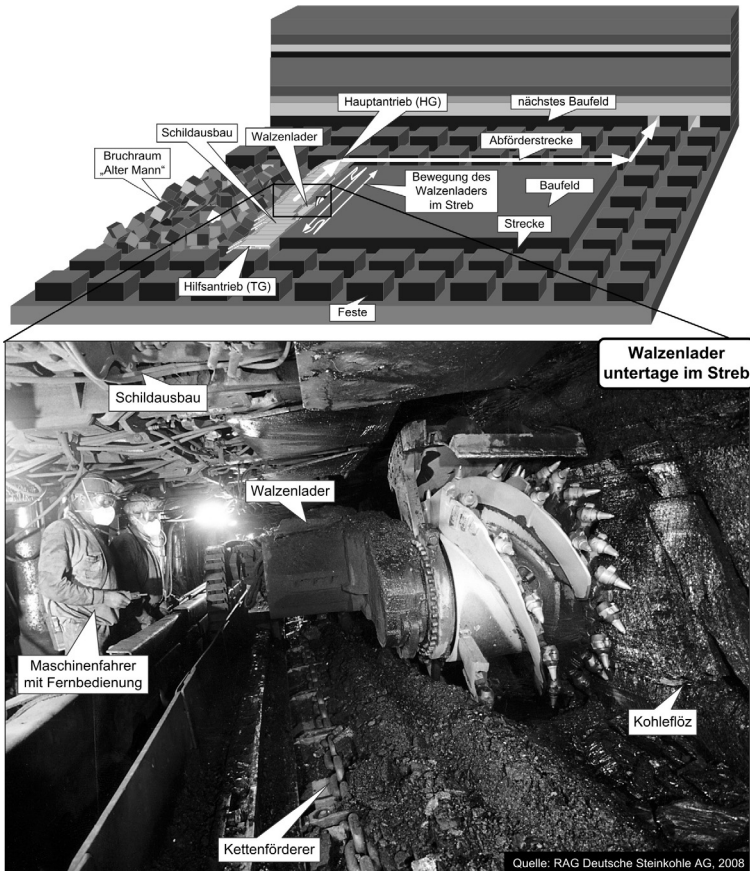


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Bergwerks mit Strebbau; Foto vom Walzenladereinsatz im Streb

¹⁰ Englische Bezeichnung ist „Longwall Mining“, zugeordnet zur Gruppe der „Caving Mining Methods“

Der Maschinenfahrer steuert den Walzenlader auf einem Kettenkratzerförderer entlang des Strebs hin und her, dabei schneidet und lädt die Maschine zeitgleich die Kohle. Der Übergang vom Streb zur Kohlenabfuhrstrecke (Streb-Strecken-Übergang), über den die Abförderung durch den Kettenkratzerförderer stattfindet, bezeichnet man mit Hauptantrieb (HG = head gate), die andere Seite nennt sich Hilfsantrieb (TG = tail gate), benannt nach der Motorenbestückung des Kettenkratzerförderers. Die Fahrt zum TG wird Bergfahrt, die zum HG Talfahrt genannt, weil sich die Maschine bei Einfallen des Strebs bergauf (schwebend) bzw. bergab (fallend) bewegt.

In Abbaurichtung hinter dem Walzenlader befindet sich der Schildausbau, der Schutz vor den freigelegten Deckschichten (Hangende) bietet. Wenn der Schildausbau dem Abbau folgt, brechen die nicht mehr gestützten Hangendschichten im Bruchraum (Alter Mann) ein, ein Vorgang, der sich bis zur Tagesoberfläche fortsetzt und dort als Senkungen bemerkbar macht. Deshalb bezeichnet man diese Methode auch als Streb-Bruchbau.

Wie in Abbildung 2-1 dargestellt, ist es in geringeren Abbauteufen üblich, zwei oder drei Begleitstrecken an jeder Seite einer Bauhöhe aufzufahren und diese in regelmäßigen Abständen miteinander zu verbinden. Jede Strecke übernimmt eine andere Funktion wie z. B. Abtransport des Wertminerals, Personen- und Materialtransport, Wetterführung und Rettungsweg. In großen Abbauteufen hingegen, wie sie in Deutschland vorkommen, wird an jeder Seite eines Strebs wegen der aufwändigen Sicherungsmaßnahmen und den damit verbundenen Kosten nur eine Strecke aufgefahren.

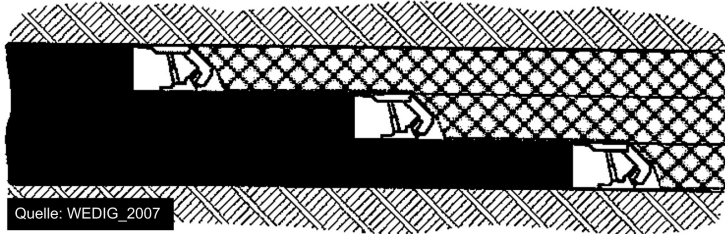
Bei einer Neigung des Flözes wandert die Abbaufont vornehmlich entlang einer Höhenlinie, so dass das als „streichende Abbaurichtung“ bezeichnet wird. Eine schwebende oder fallende Abbaurichtung ist möglich aber unüblich.

Die Abbauführung ist die Abfolge mehrerer Strebbetriebe nacheinander. Bei geeigneter Geologie werden die Baufelder so eingeteilt, dass sie nebeneinander liegen, so dass die dazwischen liegenden Begleitstrecken von dem alten sowie auch dem neuen Baufeld genutzt werden. Stehen mehrere Flöze an, dann müssen die oberen zuerst, später die in größerer Teufe abgebaut werden. Fände der Abbau zuerst in der Teufe statt, zerstörte er durch den Bruchbau die darüber liegenden Flöze.

Sonderformen des Strebbaus gibt es bei mächtigen Flözvorkommen, bei denen das Gewinnungsgerät nicht mehr die gesamte Flözmächtigkeit schneiden kann. Abbildung 2-2 stellt dar, wie das Flöz entweder in Scheiben mit mehreren übereinander laufenden Streben abgebaut (Bankweiser Abbau) oder die Kohle aus dem Streb zusätzlich über einen weiteren Förderer im Bruchraum abgezogen wird (Abzugs- oder Hangendabzugsverfahren) [AL_2007-2; RUTHERFORD et al._2007]. Abzugsverfahren werden

teilweise durch vibrierende Komponenten am Schildausbau unterstützt [XIE et al._2006]. Ältere Methoden verwenden Klappen im Schildausbau, durch die die Kohle aus dem Bruchraum auf den Strebförderer gelangt. [REUTHER et al._1989, S.445; WEDIG_2007].

Bankweiser Abbau



Abzugsverfahren (LTCC = longwall top coal caving)

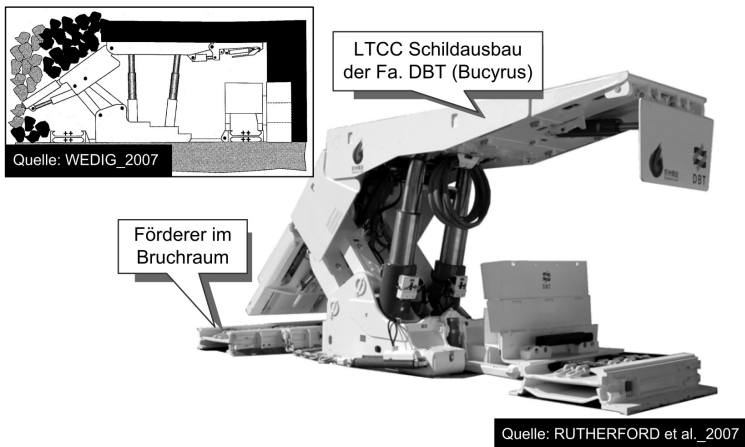


Abbildung 2-2: Zwei unterschiedliche Abbauverfahren von mächtigen Flözen

Insgesamt zeichnet sich der Strebbau durch seinen einfachen Lagerstättenzuschchnitt, die gute Bewetterungsmöglichkeit und die hohe Sicherheit aus, da sich die Strebmannschaft während der Arbeit zumeist im Schutze des Schildausbaus aufhält (vergleiche Kapitel 1.2.6). Weitere Vorteile des Strebbaus liegen in der hohen Lagerstättenausbeute von 75-80 % gegenüber anderen Abbauverfahren und der flächenhaften Absenkung der Tagesoberfläche oberhalb des Bruchraums [HARTMAN et al._1996] sowie der in Kapitel 1.2.7 beschriebenen höchsten Produktivität bei den untertägigen Abbauverfahren.

2.2 Betriebsmittel im Streb

Betriebsmittel übernehmen im mechanisierten Strebbau die vier bergmännischen Hauptaktivitäten beim Abbau von mineralischen Rohstoffen: Das Lösen, das Laden, das Transportieren und das Sichern. Moderner Strebbau setzt entweder Walzenlader für die schneidende oder Hobel für die schälende Gewinnung ein. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf den Strebbau mittels Walzenladertechnik, die die Funktionen Lösen und Laden übernimmt. Der Förderer ist zuständig für die Abförderung des geladenen Materials und der Schildausbau sichert den Abbauraum.

2.2.1 Walzenlader

Walzenlader, auch Walzenschrämlader genannt, blicken auf eine mehr als 100-jährige Entwicklungsgeschichte zurück, die ihren Ursprung im britischen und im deutschen Steinkohlenbergbau haben [KUNDEL et al._1983, S.109ff]. Einwalzenlader besitzen nur eine einzige, in der Höhe verstellbare Schneidwalze. In Hochleistungsstreibetrieben kommen sie nicht zum Einsatz. Die derzeit aktuellen Walzenladertypen für Hochleistungsstreibetriebe sind Doppelwalzenlader mit an jeder Seite angebrachten, in der Höhe hydraulisch verstellbaren Schneidwalzen (Abbildung 2-3). Die Doppelwalzenlader bestehen aus folgenden Hauptkomponenten:

- Maschinenkörper mit
 - Energieverteilung und Steuerungseinheit
 - Windenmotoren mit Getriebe
 - Kufen und Radkasten mit Triebstockrad
- Tragarme mit
 - Schneidmotoren und Schneidgetriebe
- Schneidwalzen mit Schraubengängen und Meißelbesatz

2 Systembeschreibung

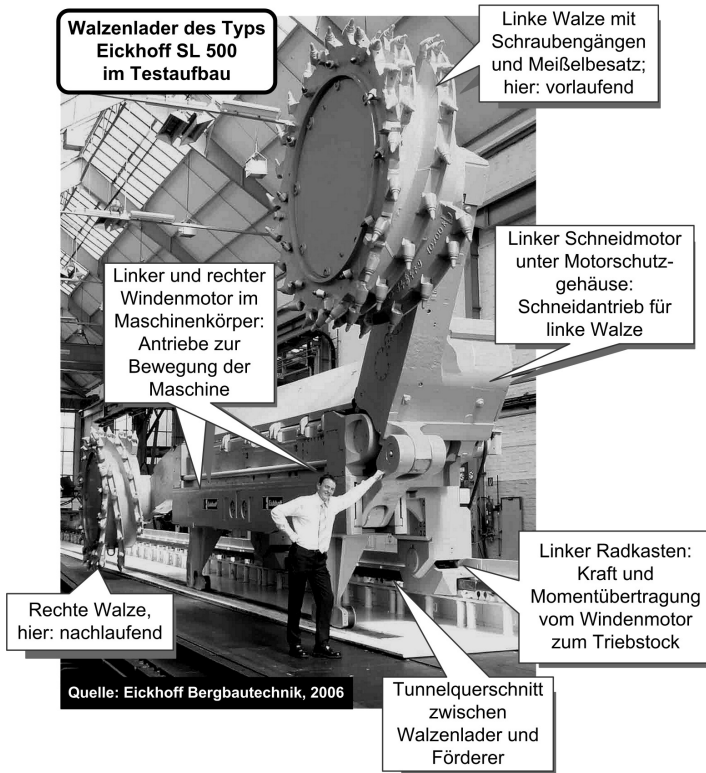


Abbildung 2-3: Walzenlader inkl. wichtigster Komponenten und Person zum Größenvergleich

Walzenlader sind ca. 15 m lang, wiegen zwischen 40 und 110 Tonnen und können Flözmächtigkeiten ab ca. 1,4 m und bis zu ca. 6,8 m mit einer installierten Gesamtleistung zwischen 900 und 2.600 kW schneiden [PENG_2006, S.257ff; RIESER et al._2007]. Dabei erreichen sie Marschgeschwindigkeiten von etwa 37 m/min im Schneidvorgang bzw. ca. 45 m/min in der Leerfahrt. Sie erzeugen maximale Andruckkräfte von mehr als 1.000 kN [PENG_2006, S.257ff]. Als Tunnelquerschnitt wird die freie Fläche zwischen Maschinenkörper und Förderer bezeichnet, durch die die gelöste Kohle teilweise hindurchgefördert werden muss. Bei großen Maschinen übersteigt der Tunnelquerschnitt einen Quadratmeter und wird deshalb kaum ein begrenzender Faktor sein. Bei kleinen Maschinen in niedrigen Mächtigkeiten verringert sich der Tunnelquerschnitt auf weniger als einem Viertel eines Quadratmeters, so dass er unter Umständen begrenzend auf die Marschgeschwindigkeit des Walzenladers wirkt, weil

nur noch eine geringe Menge an geschnittenem Material unter den Maschinenkörper passt. Eine detaillierte Betrachtung u. a. dieser Fragestellung erfolgt in Kapitel 3.1.

Walzenlader können kabelgebunden oder über Funkfernsteuerungen gefahren werden. Die Tragarmstellung und Aktivierung der Schneidmotoren geschieht mit jeweils einer eigenen Steuereinheit für die linke und die rechte Seite, so dass zwei Maschinenfahrer eine Maschine steuern. Ist ein Walzenlader mit einer Teilautomatik ausgestattet, kann die Maschine mit nur einem Maschinenfahrer bedient werden. Die Steuerung der nachlaufenden Walze übernimmt das Teilautomatisierungssystem. Memory-Funktionen sind dabei in der Lage, die Tragarmstellungen über einen Schnitzzyklus bei Bedarf aufzuzeichnen, so dass anhand dieser Daten mehrere Schnitzzyklen hintereinander gefahren werden können, bis die geologische Situation im Streb soweit verändert ist, dass erneut ein manueller Lernschnitt vom Maschinenfahrer durchgeführt werden muss. Entwicklungsarbeiten in Richtung einer sensorgesteuerten Vollautomatisierung werden derzeit von den Walzenladerherstellern durchgeführt [HACKELBÖRGER et al._2007].

2.2.2 Förderer, Abfördersystem

Strebförderer wurden in den 1940er Jahren im deutschen Steinkohlenbergbau als druckluftgetriebene Abförderhilfe eingeführt. Heute setzen sich Strebförderer aus Rinnelementen von ca. 1.500 bis 2.000 mm Länge und mit einer Breite von ca. 800 bis 1.500 mm zusammen, die zueinander in Grenzen horizontal und vertikal abwinkelbar sind. Sie besitzen eine offene Ober- und eine verdeckte Unterseite, in denen der Ober- und Untertrum des mit Mitnehmern bestückten Kettenstrangs (38-52 mm Rundstahl- oder Flachketten) bei Geschwindigkeiten von ca. 1,5 bis 2,3 m/s läuft [PENG_2006, S. 371]. Die Kettenbänder bestehen hauptsächlich aus Doppelmittelketten, selten aus zwei Außenketten oder Dreifachketten. Ist nur eine Kette vorhanden, spricht man von einer Mittelkette (Abbildung 2-4) [HARTMAN et al._1996].

Die Antriebsleistungen der Elektromotoren reichen von ca. 400 bis über 1.200 kW für einen Motor. Der Strebförderer besitzt mindestens einen, üblicherweise zwei Motoren am Hauptantrieb und einen weiteren am Hilfsantrieb. Die gesamte installierte Leistung des Förderers, die bis zu 4.500 kW betragen kann [IM_2007], stellt in dem System u. U. eine denkbare begrenzende Größe dar. Bei zu geringer installierter Motorleistung am Förderer kann eine Einschränkung der Marschgeschwindigkeit des Walzenladers aufgrund zu großer Masse auf dem Förderer erforderlich sein.

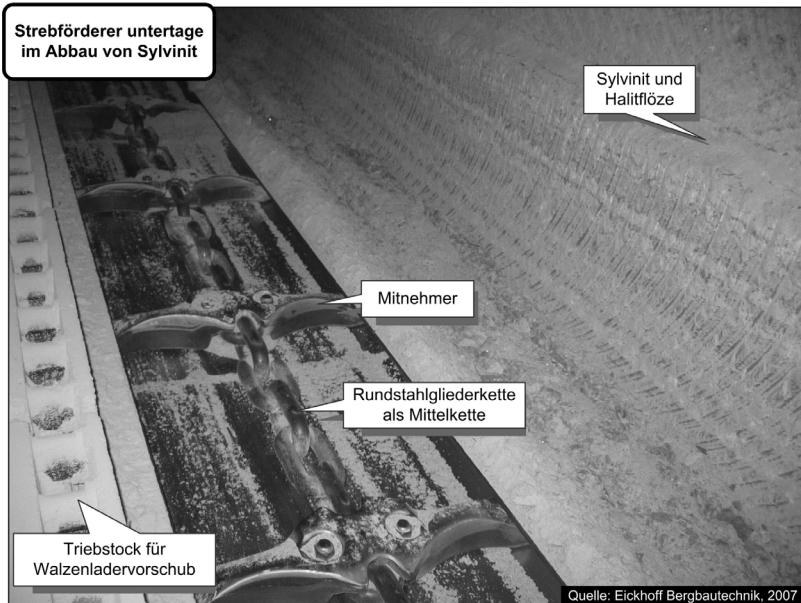


Abbildung 2-4: Kettenkratzerförderer mit Mittelkette in einem Walzenstreb auf Sylvinit

Ein weiterer Engpass kann der Beladungsquerschnitt sein, den der Förderer maximal aufnehmen kann. Er hängt von der Beladungsgeschwindigkeit ab, die als Relativgeschwindigkeit zwischen dem Walzenlader und der Fördererkette definiert ist. Die Beschreibung und die Formel, wie Marschgeschwindigkeit des Walzenladers und Beladungsquerschnitt des Förderers zusammenhängen, beinhaltet Kapitel 3.1.5.

Weitere Aufgaben des Strebförderers sind das Führen des Walzenladers, der auf den Rinnen gleitet und sich über einem am Förderer angebrachten Triebstock vorwärts zieht bzw. schiebt (Abbildung 2-4). Daneben dient er als Anschlagpunkt des Schildausbaus, wodurch die Schilde einzeln vorrücken können.

2.2.3 Schildausbau

Der Schildausbau hat die Aufgabe, den Abbauraum zu sichern und offen zu halten, indem er sich zwischen Hangendem und Liegendem verspannt und somit die unmittelbaren Hangendschichten oberhalb des Abbaus stützt. Dadurch sichert er Personal und Technik, die sich im Streb befindet und gewährleistet, dass ein definierter Querschnitt für die Bewetterung offen bleibt. Er dient zudem als Widerlager für die Kräfte, die beim

2 Systembeschreibung

Rücken des Förderers, der einzelnen Schilde und für den Andruck des Walzenladers an den Stoß nötig sind.

Ein moderner Schildausbau besteht hauptsächlich aus Zweistempelschilden (Abbildung 2-5). Ausnahmen bilden Vierstempelschilde, die den erhöhten Gebirgsdruck am Strebrand aufnehmen. Strebbau mit manuell zu steuernden oder gar manuell zu versetzenden Rahmen oder Böcken kommt in Hochleistungsstreibetrieben nicht mehr zum Einsatz. Die leicht zum Stoß geneigten Hydraulikzylinder leiten hauptsächlich eine vertikale, in geringem Umfang auch eine horizontale Ausbaustützkraft in die Hangendschichten ein. Bei einer Ausstattung mit Hydraulikzylindern von mehr als 400 mm Durchmesser kann die gesamte Kraft eines Zweistempelschilds 11.500 kN überschreiten [PENG_2006, S.135].

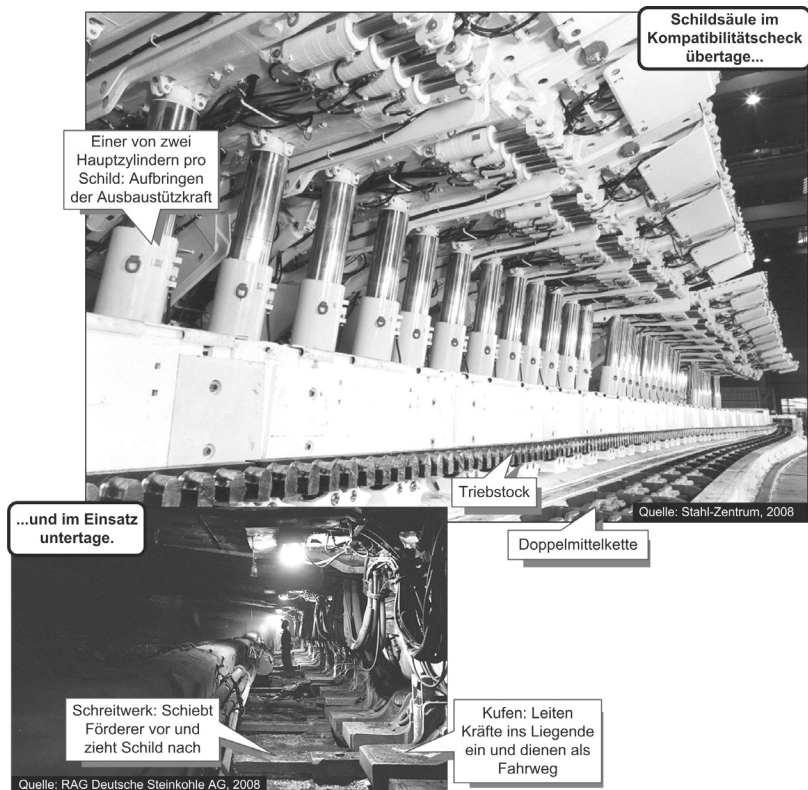


Abbildung 2-5: Schilde im Testaufbau über Tage und im Einsatz unter Tage

Jeder Zweistempelschild ist ca. 1.500 bis 2.000 mm breit und besitzt eine am Hangenden anliegende Hauptkappe von bis zu ca. 5 m Länge. Der hintere Teil besteht aus einer Bruchkappe, die in Richtung des Bruchraums zeigt und das darunter liegende Getriebe sowie den Eckzylinder zwischen Haupt- und Bruchkappe schützt. Kufen lassen den eingeraubten Schild beim Vorziehen über das Liegende gleiten und leiten die Kräfte des gesetzten und verspannten Schilds ins Liegende ein. Das zwischen den Kufen liegende Schreitwerk verbindet Schildausbau mit dem Förderer, und sorgt einerseits dafür, dass der Förderer bei Bedarf nach vorne an den Stoß geschoben wird, und andererseits, dass sich der eingeraubte Schild am Förderer vorzieht.

Moderner Schildausbau ist über elektrohydraulische Schaltungen vollautomatisch gesteuert. Der Walzenlader kommuniziert zumeist über eine Infrarotverbindung mit den Schilden, so dass die Ausbausteuerung die Position des Walzenladers erkennt und die entsprechenden Schilde in Abhängigkeit vom programmierten Schnittverfahren vorzieht. Bei Einsatz von qualitativ hochwertigen Materialien für den Stahlbau hat der Schildausbau eine Lebensdauer von 50.000-70.000 Schreitzyklen [PENG_2006, S.138].

2.3 Verfahrenstechnik

Walzenlader-Schnittverfahren sind Methoden, das zu gewinnende Material aus dem Flöz zu lösen, so dass nach Durchlauf eines Schneidzyklus der Walzenlader wieder an relativ gleicher Position zu den anderen Betriebsmitteln steht, während der gesamte Streb dabei um eine oder ggf. zwei Schnittiefen in Abbaurichtung vorangeschritten ist.

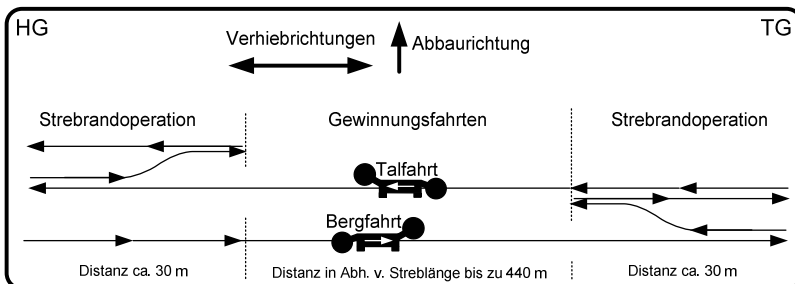


Abbildung 2-6: Draufsicht eines Schnittverfahrens mit Gewinnungsfahrten und Strebrandoperationen

Der Ablauf eines Schnittverfahrens lässt sich in zwei Arten von Bereichen unterteilen (Abbildung 2-6). Zum einen gibt es die Gewinnungsfahrt des Walzenladers, die über den Großteil der Streblänge stattfindet und durch eine höhere Geschwindigkeit und höhere Gewinnungsleistung gekennzeichnet ist. Zum anderen muss der Walzenlader

an mindestens einem der Strebränder in die neue Schnitttiefe bei verringerter Marschgeschwindigkeit und deshalb geringerer Gewinnungskapazität einschneiden, was Strebrandoperation genannt wird.

In der am weitesten verbreiteten Methode für die Strebrandoperation wird der Förderer horizontal in S-Form abgewinkelt gerückt, damit der Walzenlader schräg in den Stoß einschneidet, bis beide Walzen in der neuen Schnitttiefe eingedrungen sind. Durch Geraderücken des Förderers und Richtungsumkehr der Walzenladerfahrt wird der keilförmig stehen gebliebene Stoß am Strebrand frei geschnitten. Diese Methode der mehrfachen Richtungsumkehr, die je nach Marschgeschwindigkeit 5 bis 15 min dauert, wird auch als Schleifenfahrt wegen des mehrmaligen Hin- und Zurückfahrens bezeichnet. Einschneidevorgänge sind nicht auf den Strebrand beschränkt, denn Walzenlader können an jedem beliebigen Punkt im Streb in die neue Schnitttiefe eindringen. Andere Einschneidemethoden sind aus dem Salzabbau bekannt, bei denen mit einem teleskopierbaren Tragarm oder einer eigens dafür vorgesehenen Maschine ein Freiraum, der so genannte Stall, am Strebrand geschnitten und danach der Walzenlader auf dem Förderer hinein geschoben wird [LANGE_2007].

2.3.1 Klassifizierung der Schnittverfahren

Im Folgenden werden die Schnittverfahren in Klassen eingeteilt und anschließend beschrieben. PENG teilt prinzipiell alle Schnittverfahren in zwei Klassen ein, indem er die Schnitttiefe und die Verhiebrichtung als Kriterium anführt [PENG_2006]: Die bi-direktionale und die uni-direktionale Klasse. Als bi-direktional wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem der Walzenlader in beiden Fahrtrichtungen jeweils mit voller Schnitttiefe und maximaler Gewinnungshöhe schneidet. Uni-direktional werden die Verfahren genannt, bei denen der Walzenlader nur in einer Richtung eine Hauptgewinnungsfahrt hat, jedoch in der Gegenrichtung mit hoher Geschwindigkeit ohne zu schneiden, ggf. räumend, auf dem gleichen Weg zur Ausgangsposition zurückfährt, so dass mit zwei Fahrten nur eine Schnitttiefe gelöst wird. PENG teilt aber auch jene Verfahren in die uni-direktionale Klasse ein, bei denen der Walzenlader auf der ersten Fahrt nur den oberen Teil des Flözes löst und auf der Rückfahrt den unteren Teil mit der Begründung, dass diese Methode auch nur eine Schnitttiefe in Abbaurichtung bei zwei Walzenladerfahrten gewinnt. Tatsächlich liegen dabei zwei Verhiebrichtungen vor, so dass sich ein Widerspruch zu seiner Definition von uni-direktional mit nur einer Verhiebrichtung ergibt. HARTMAN spricht lediglich von bi-direktionalen und uni-direktionalen Verfahren, führt das aber nicht weiter aus [HARTMAN et al._1996]. RUTHERFORD verwendet neben den Begriffen bi-direktional („Bi-directional cutting“) und uni-

2 Systembeschreibung

direktional („Uni-directional cutting“) auch die Begriffe „Variable Web Kaiser Cut“ und „Variable Web Uni-Di Variant“ [BAHR et al._2005; RUTHERFORD_2008].

Weil die Namensgebung der Verfahren teilweise lokal geprägt und eine global einheitliche Nomenklatur noch nicht vorhanden ist, wird nachfolgend eine selbst entwickelte Klasseneinteilung und Namensgebung vorgestellt, die sich an die Einteilung von NIENHAUS und BAYER anlehnt [NIENHAUS et al._2003]. Die bekannten Verfahren werden nach den Kriterien Schnitttiefe und geschnittene Mächtigkeit klassifiziert, benannt und anschließend mit ihren Varianten beschrieben.

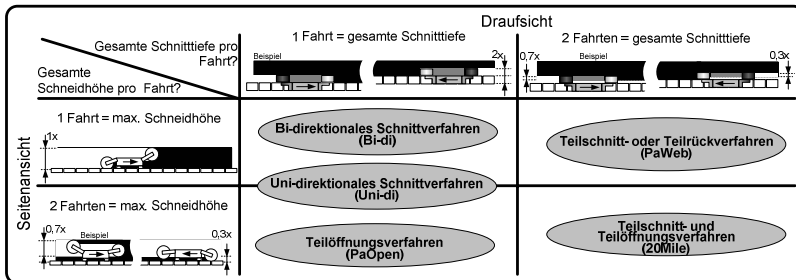


Abbildung 2-7: Klassifizierung der Schnitverfahren mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (oben)

Die hier vorgestellte Klassifizierung (Abbildung 2-7) überprüft lediglich die Gewinnungsfahrt, d.h. ob zum einen die gesamte Schnitttiefe und zum anderen die gesamte Schneidhöhe im Verbieh steht. Die Strebrandoperation wird dabei zunächst vernachlässigt, weil sich diese automatisch aus der Art der Gewinnungsfahrt ergibt.

Wenn die gesamte Schnitttiefe und die gesamte Schneidhöhe während einer Fahrt gelöst werden, dann entspricht dies dem klassischen bi-direktionalen Verfahren (Bi-di) mit zwei Verbiehrichtungen. Fährt der Walzenlader mit hoher Marschgeschwindigkeit leer zurück, oder räumt er das Liegende, dann handelt es sich um das Uni-direktionale Verfahren (Uni-di), da nur in einer Richtung ein Schneidvorgang stattfindet. Es kommt auch vor, dass bei gleichem Bewegungsablauf der Walzenlader auf der ersten Fahrt zweckmäßig Liegendkohle stehen lässt, um sie erst auf der Rückfahrt zu gewinnen. Handelt es sich nur um ein intensives Reinigen des Liegenden bei hoher Marschgeschwindigkeit, dann soll es noch als Uni-di bezeichnet werden. Wird aber ein signifikanter Anteil auf der Rückfahrt geschnitten, so dass in beiden Richtungen ein Gewinnungsvorgang bei reduzierter Marschgeschwindigkeit stattfindet, ist das Verfahren per Definition kein Uni-di, sondern ein Teilöffnungsverfahren (PaOpen = Partial

Opening), bei dem die gesamte Flözmächtigkeit in mehreren Schritten abgebaut wird. Der Übergang vom Uni-di zum PaOpen ist somit fließend.

Gewinnt der Walzenlader auf einer Fahrt die gesamte Schneidhöhe, verwendet aber eine reduzierte Schnitttiefe, dann heißt das Verfahren Teilschnittverfahren (PaWeb = Partial Web¹¹) oder Teilrückverfahren¹². Die Kombination aus dem teilweise Einschnneiden des Teilschnittverfahrens und dem Stehen lassen von Kohle für die Rückfahrt wird als Teilschnitt-Teilöffnungsverfahren (PaWeb-PaOpen oder 20Mile = Twentymile¹³) bezeichnet.

Im Detail lassen sich viele Variationen der Schnittverfahren finden, die aus betrieblichen Gegebenheiten und Erfahrungen entstanden sind. Die Gemeinsamkeit aller Schnittverfahren liegt darin, dass sie am Strebrand in voller Schnitttiefe enden, um dort die Kohle möglichst in einem Arbeitsgang zu lösen.

2.3.2 Bi-direktionale Methode

Die Bi-di Methode ist unter den Strebbetrieben in den USA inzwischen am weitesten verbreitet [PENG_2006, S.291ff], in Australien kommt sie in ca. der Hälfte aller Strebbetriebe vor [BAHR et al._2005]. Sie ist gekennzeichnet durch jeweils eine Strebrandoperation mit Schleifenfahrt an beiden Strebenden, bei der der Walzenlader mehrfach seine Richtung und die Tragarmstellungen wechseln muss (Abbildung 2-8).

Nach Beendigung der Strebrandoperation geht der Walzenlader zur Gewinnungsfahrt in Richtung des anderen Strebendes über. Die vorlaufende Walze ist komplett bis ans Hangende angehoben, die nachlaufende Walze schneidet am Liegenden. Hinter dem Walzenlader rücken der Schildausbau und der Förderer an den neu freigelegten Stoß vor. Nach Richtungsumkehr des Walzenladers ist der Förderer S-förmig an den Stoß gerückt und der Walzenlader kann in die neue Schnitttiefe eindringen.

Das Bi-di Verfahren zeichnet sich durch hohe Förderleistungen bei relativ geringen Marschgeschwindigkeiten aus. Nachteilig ist der über einen Schneidzyklus vermehrt schwankende Massenstrom. Das ist eine Folge der leistungsstarken Vollschnitte in der Strebmitte und der leistungsschwachen, weil zeitintensiven Strebrandoperationen. Mit längeren Streblängen verringert sich der relative Einfluss der Strebrandoperationen, so dass das Bi-di Verfahren zunächst an Vorteil gewinnt (vergl. Kapitel 4). Begrenzend

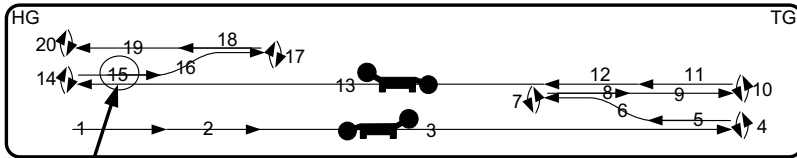
¹¹ „Web“ = engl. für Schnitttiefe

¹² Der Förderer ist bei dem Verfahren nur zum Teil gerückt, d.h. der Rückzylinder wird nur teilweise eingezogen.

¹³ Das Verfahren wurde zuerst in der Twentymile Mine in Colorado entwickelt.

wirkt hingegen die größere Förderbelastung in Bezug auf installierter Motorleistung und vorhandener Bruchkraft der Fördererkette.

20 Schritte im Bi-di Schnittverfahren



Strebrandoperation im Bi-di: Schleifenfahrt

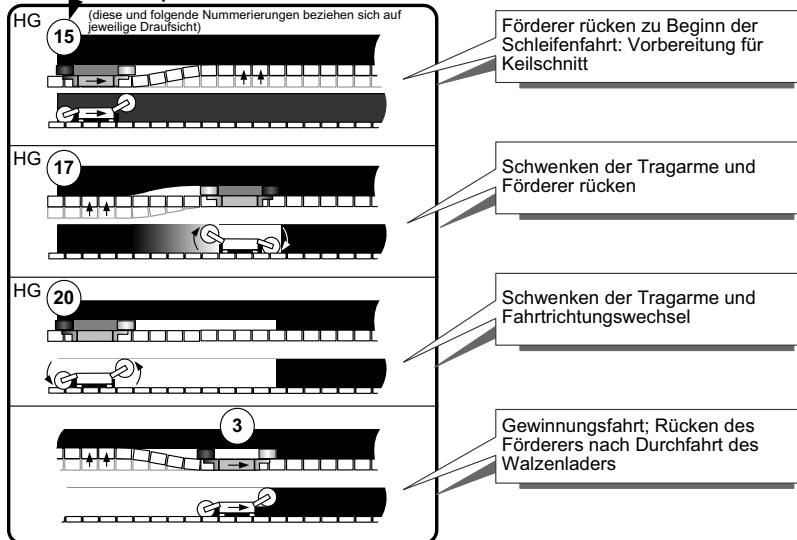


Abbildung 2-8: Prinzipskizze des Bi-direktionalen Schnittverfahrens mit Draufsicht (oben) und ausgewählten Schritten in Drauf- und Seitenansicht (links)

Als nachteilig erweist sich ebenfalls der Umstand, dass während einer Gewinnungsfahrt mindestens einer der Maschinenfahrer auf der Abwetterseite der Maschine steht und somit in Staub belasteten Wetter arbeiten. Mit zunehmender Verbesserung der Arbeitssituation durch Bedüsung und Teilautomatisierung der Maschine wird diese Staubproblematik jedoch gemindert. Entweder bindet die Bedüsung den Staub oder der Maschinenbediener muss sich durch die Teilautomatik nicht mehr unmittelbar an der zu steuernden Schneidwalze aufhalten.

Variation im Bi-di: Gespiegelte Schleifenfahrt

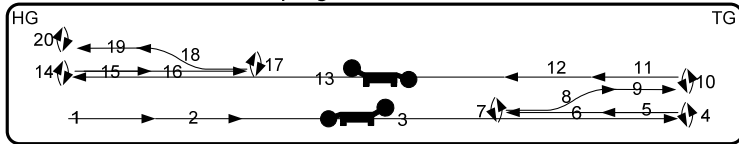


Abbildung 2-9: Gespiegelte Bi-di Schleifenfahrt in der Draufsicht

Eine Variation des Bi-di Verfahrens ist bei den Strebrandoperationen bekannt, bei denen das Einschneiden gespiegelt zur ersten Methode durchgeführt wird. Der Walzenlader fährt über die Distanz des Strebrandbereichs auf dem noch nicht gerückten Förderer wieder leer bzw. das Liegende säubernd zurück (Abbildung 2-9, Nr. 15 und 16). Danach schiebt der Schildausbau den Antrieb und Förderer an den gerade freigelegten Stoß, so dass der Walzenlader Richtung Strebende anstatt Richtung Strebmittle in den Stoß einschneidet [LANGE_2007-2]. Weil diese Bewegung lediglich gespiegelt zu der oben beschriebenen Strebrandoperation stattfindet, ist von einer gleichen Gewinnungsleistung wie bei der ursprünglichen Methode auszugehen. Diese Variante des Einschneidens hat den positiven Effekt, dass der Bereich der Antriebe besser geräumt ist, was den Rückvorgang vereinfacht. Ebenso findet eine schnellere Hangendunterstützung der von Gebirgsdruckspitzen geprägten Streb-Strecken-Übergänge statt, und das erweist sich als vorteilhafter für die Hangendbeherrschung.

Variation im Bi-di: Geänderte Tragarmstellung

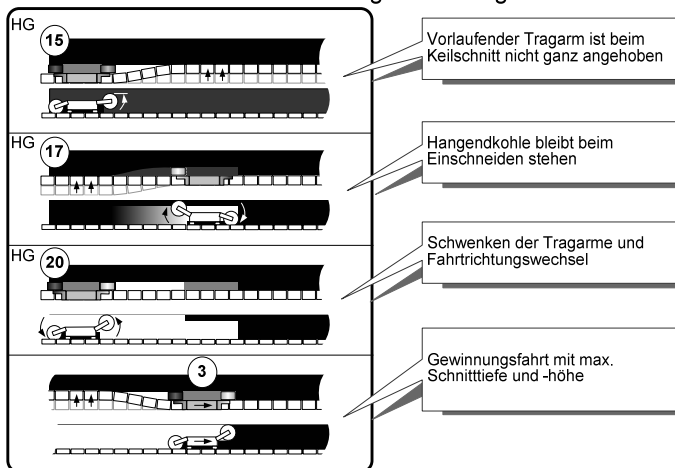


Abbildung 2-10: Variation in der Tragarmstellung bei der Schleifenfahrt, Drauf- und Seitenansichten

Eine weitere Variationsmöglichkeit betrifft die Tragarmstellung der vorlaufenden Walze während der Schleifenfahrt (Abbildung 2-10). Wenn beim Einschneidevorgang in den neuen Stoß der vorlaufende Tragarm in einer mittleren Stellung anstatt ans Hangende angehoben wird, schneidet er die verbleibende Hangendkohle erst beim zweiten Vorbeifahren [RUTHERFORD_2006], sofern sie nicht vorher ausbricht. Die Variante erzielt den positiven Effekt, dass sich die Leerfahrten geringfügig zugunsten von Fahrten mit Restkohlenschnitt reduzieren und deshalb der Massenstrom auf dem Förderer geringfügig ausgeglichener wird. Weil aber der Schildausbau das Hangende erst nach zweiter Vorbeifahrt des Walzenladers stützen kann, ist ein standfestes Hangende Voraussetzung.

Wenn die Kohle nicht ausreichend im Bereich der Antriebe auf den Förderer geladen wurde, d.h. die Antriebe nicht frei sind, muss der Walzenlader erneut zum Räumen in den Streb-Strecken-Übergang fahren. Die Skizze in Abbildung 2-11 zeigt diese Variante und den dadurch erhöhten Einfluss der zeitaufwändigen und leistungsschwachen Strebrandoperation innerhalb des Gesamtzyklus mit der Folge einer geringeren durchschnittlichen Gewinnungskapazität.

Variation im Bi-di: zusätzliche Räumfahrten

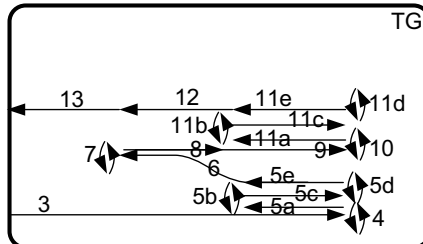


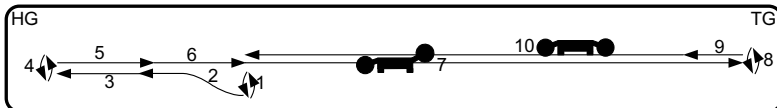
Abbildung 2-11: Draufsicht mehrerer Räumfahrten und Richtungswechsel im Bereich der Antriebe

2.3.3 Uni-direktionales Schnittverfahren

Das Uni-direktionale Schnittverfahren ist per Definition das Schnittverfahren bei voller Schnitttiefe, bei dem lediglich in einer Richtung eine Gewinnungsfahrt stattfindet (Abbildung 2-12). Die Rückfahrt über die gleiche Fläche wie bei der Gewinnungsfahrt ist entweder eine Leerfahrt, bei dem der Walzenlader mit beiden Walzen das Liegende säubert, oder es handelt sich um eine Fahrt, bei der der Walzenlader einen Rest Liegendkohle mit hoher Geschwindigkeit schneidet und lädt.

Die Maschine fährt während des Einschneidens auf einem abgewinkelten Förderer in den Stoß hinein und schneidet bis zum Streb-Strecken-Übergang. Je nach Position des Einschneidens im Streb handelt es sich dabei um die Gewinnungsfahrt. Am Strebende wechselt er die Tragarmstellung und beginnt nach der Richtungsumkehr mit der Fahrt zum anderen Strebende. Eine Schleifenfahrt wie beim Bi-di findet nicht statt.

10 Schritte im Uni-di Schnittverfahren



Strebrandoperation im Uni-di Schnittverfahren

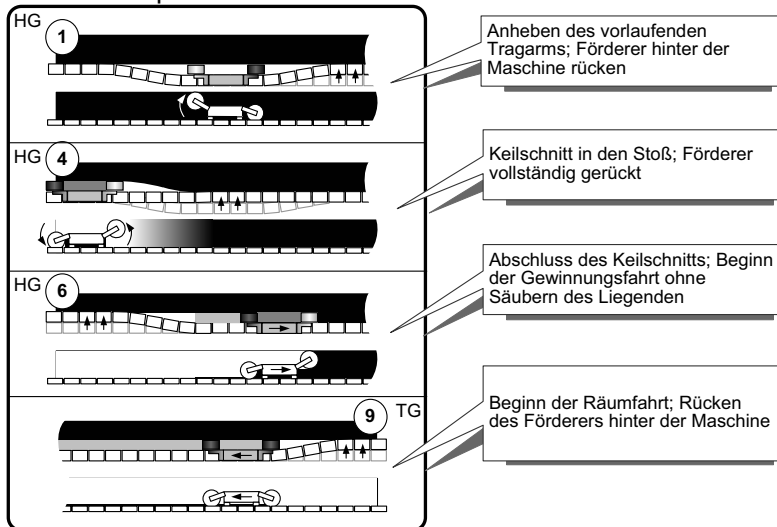


Abbildung 2-12: Prinzipskizze des Uni-direktionalen Schnittverfahrens in Drauf- und Seitenansichten

Der Nachteil des Uni-di ist die im Vergleich zum Bi-di geringere Gewinnungskapazität, die dadurch entsteht, dass die meisten Flächen zweimal überfahren werden bei nur einfacher Gewinnung. Aus dem gleichen Grund kommt aus einem Uni-di Strebbetrieb ein sehr stark schwankender Massenstrom, der zu einer schlechten Auslastung des Fördersystems führt.

Vorteile des Verfahrens liegen in der Ausrichtung der Gewinnungsfahrten, die dazu führen, dass sich der Maschinenbediener zumeist in frischen Wettern bei geringer Staubbelastung aufhalten kann und zudem eine gute Sicht auf die Schneidwalze hat [LANGE 2007-3].

Der Ort des Einschnaidevorgangs kann bei diesem Schnittverfahren überall im Streb liegen. Es gibt Varianten, in denen der Einschnaidevorgang wie oben beschrieben in der Nähe des Hauptantriebs liegt, er kann aber auch am Hilfsantrieb oder in der Mitte des Strebs durchgeführt werden, je nach Beladungssituation des Förderers und Bewetterungssituation im Streb. Beim Einschnaide in der Mitte spricht man vom „Half-face“-Verfahren¹⁴ [PENG_2006, S.293f]. Dabei findet zwar in beiden Richtungen eine Gewinnungsfahrt statt, weil aber die Hälfte des Stoßes jeweils nur in einer Richtung im Verhieb steht, ist diese Variante konform mit der in Kapitel 2.3.1 getroffenen Definition. Diese Variante wird derzeit im afrikanischen Strebbau angewendet [RUTHERFORD 2008].

Eine andere Variationsmöglichkeit des Uni-di bietet die Richtungsänderung beim Einschneiden. Es kann wie oben dargestellt kurz vor dem Richtungswechsel am Streb-Strecken-Übergang erfolgen, dann spricht man vom „forward snake“¹⁵. Der Walzenlader fährt auf dem abgewinkelten Förderer in den neuen Stoß und leitet daraufhin am Antrieb einen Richtungswechsel ein. Währenddessen wird der Förderer gerade gerückt, so dass der Walzenlader die Gewinnungsfahrt beginnen kann. Geschieht das Einschneiden erst nach dem Richtungswechsel zu Beginn der Gewinnungsfahrt, nennt sich die Prozedur „backward snake“ (Abbildung 2-13) [PENG 2006, S.301f].

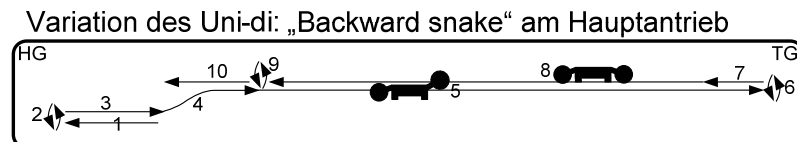


Abbildung 2-13: Variation des Uni-direktionalen Schnittverfahrens „backward snake“

¹⁴ „Face“ = engl. für Stoß.

¹⁵ „Snake“ = engl. für abgewinkelten Förderer

Bei dieser Variante verbleibt am Hauptantrieb über die gesamte Dauer des Schneidzyklus ein Keil an Kohle stehen, der erst zum Ende der Rückfahrt geschnitten wird. Nur für einen kurzen Zeitraum in dem Schneidzyklus ist der Stoß auf der gesamten Streblänge begradigt. Ein Vorteil dieser Methode liegt darin, dass der Förderer beim Einschneidevorgang nur einmal abgewinkelt ist, danach wird er über die gesamte Streblänge gerade ausgerichtet. Beim „forward snake“ finden zwei Abwinklungen zeitgleich statt, die eine Erhöhung der Widerstände in der Fördererkette bewirken.

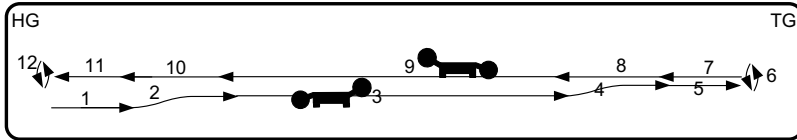
2.3.4 Teilschnittverfahren

Das Teilschnittverfahren (PaWeb) ist durch die Eigenschaft gekennzeichnet, das Material nicht mit voller Schnitttiefe in einer Fahrt, sondern die gesamte Schnitttiefe aufgeteilt auf die Hin- und Rückfahrt zu schneiden. Der Walzenlader fährt dabei vom Hauptantrieb über den nur teilweise abgewinkelten Förderer in den Stoß hinein, schneidet auf der Gewinnungsfahrt mit verminderter Schnitttiefe ans andere Ende, wo der Förderer erneut teilweise abgewinkelt den Walzenlader zur vollen Schnitttiefe eindringen lässt (Abbildung 2-14). Das Gewinnungsgerät räumt anschließend den Streb-Strecken-Übergang am Hilfsantrieb frei. In der Zwischenzeit rückt der zweimal teilweise abgewinkelte Förderer über die gesamte Streblänge in eine gerade Position vor, so dass der Walzenlader bei seiner Rückfahrt am zweimal keilförmig abgestuften Stoß entlang fährt. Das bedeutet, dass die Maschine auf der zweiten Gewinnungsfahrt den Rest zur vollen Schnitttiefe gewinnt und am Hauptantrieb im Vollschnitt endet.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass nur zwei Richtungswechsel innerhalb eines Schneidzyklus stattfinden, so dass der Anteil der leistungsschwachen Strebrandoperationen gering ist. Der resultierende Massenstrom ist relativ gleichmäßig und deshalb vorteilhafter für nachgeschaltete Fördermittel. Bedingt durch die geringe Schnitttiefe werden größere Knäpper¹⁶ auf dem Förderer vermieden. Vorteilhaft wirkt sich auch das Verfahren dann aus, wenn es sich um hartes Material handelt. Eine Verringerung der Angriffsfläche in Verhiebrichtung erhöht den Andruck bei gleichbleibender Windenleistung und Marschgeschwindigkeit.

¹⁶ Brocken oder Klumpen

12 Schritte im Teilschnittverfahren



Teilschnittverfahren

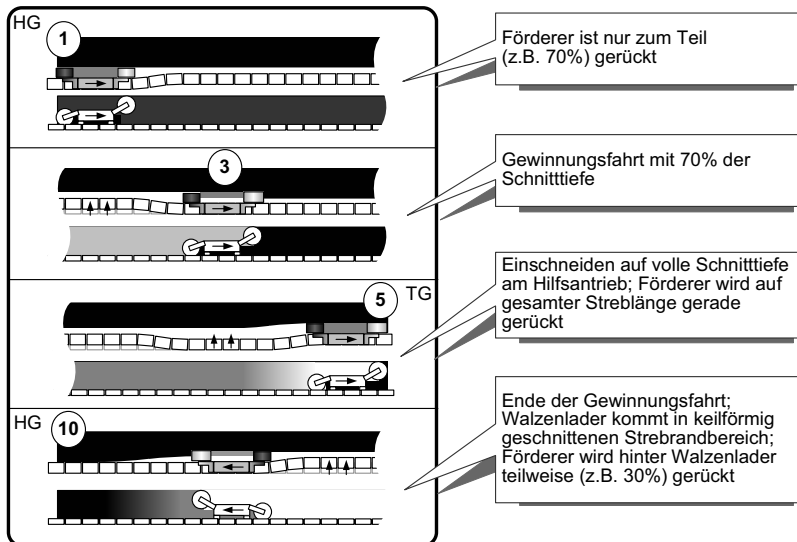


Abbildung 2-14: Prinzipskizze in Draufsicht (oben) und Seitenansicht (links) des Teilschnittverfahrens mit variabler Schnitttiefe

Einer der beiden wesentlichen Nachteile dieses Verfahrens im Gegensatz zum Bi-di liegt in der relativ geringen durchschnittlichen Gewinnungskapazität bei gleicher Marschgeschwindigkeit: Der Walzenlader muss zwei Fahrten durchführen, um die gleiche Menge zu schneiden. Erst hohe Marschgeschwindigkeiten ermöglichen dem Verfahren eine gleiche oder sogar bessere Kapazität als dem Bi-di, aber diese wirken sich im Gegenzug negativ auf den Verschleiß der Maschine, des Triebstocks und des Förderers aus. Zugleich sind hohe Marschgeschwindigkeiten für die Maschinenfahrer eine höhere Belastung bzw. bei niedrigen Strebbzuschnitten ist es unmöglich, der Maschine schnell zu folgen. Der zweite entscheidende Nachteil dieses Verfahrens liegt in dem ständigen verfahrenstechnisch bedingten Abstand von ca. einer halben Schnitttiefe zwischen Kappenspitze und Kohlenstoß. Ungünstige Hangendverhältnisse sind für dieses Verfahren somit ein Ausschlusskriterium.

Variationen bei diesem Verfahren gibt es bei der Aufteilung der Schnittiefen auf die Hin- und Rückfahrt. Wenn die Aufteilung genau 50 % der Gesamtschnitttiefe für jede Durchfahrt beträgt, dann wird das Verfahren als „half web“ bezeichnet, wobei diese Variante kaum benutzt wird [RUTHERFORD_2008]. Eine übliche Einteilung der Schnitttiefe ist 60 oder 70 % bei der Bergfahrt und 40 bzw. 30 % bei der Talfahrt [LANGE_2007-2; RUTHERFORD_2008] je nach gewünschter Ausbalancierung der Beladung auf dem Förderer (siehe Kapitel 3.2.1).

2.3.5 Teilöffnungsverfahren

Das Teilöffnungsverfahren ist auf dem südafrikanischen Bergwerk Matla für kurze Strebe entwickelt worden und wird auf dem Bergwerk „Opti Cycle“ genannt [NIENHAUS et al._2003]. Die allgemeine Bezeichnung des Verfahrens ist das Partial Opening (PaOpen), während PENG es als „modified Uni-di“¹⁷ [PENG_2006, S.300] bezeichnet. Zur Zeit der Fertigstellung dieser Arbeit ist das Verfahren nicht im Einsatz [RUTHERFORD_2008].

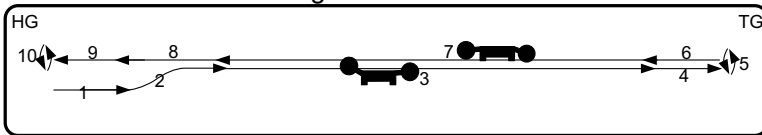
Der Walzenlader schneidet dabei die gesamte Flözmächtigkeit nicht in einem, sondern gewinnt auf der Hinfahrt die obere Hälfte und auf der Rückfahrt die untere Hälfte (Abbildung 2-15). Nach Beginn am Hauptantrieb schneidet er sich vollständig über einen abgewinkelten Förderer in den Stoß ein. Dabei wird der vorlaufende Tragarm in einer mittleren Position gehalten, so dass noch Material für die nachlaufende und ganz ans Hangende angehobene Walze stehen bleibt. In Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen Förderer und Walzenlader schneidet die Maschine auf der Hinfahrt ungefähr die oberen zwei Drittel des Flözes. Etwa eine Maschinenlänge vor Strebende muss die vorlaufende Walze ans Hangende angehoben werden, damit keine Kohle über dem Maschinenkörper stehen bleibt. Am Strebende angekommen senkt sie beide Tragarme, so dass das am Liegenden verbliebene Material von beiden Walzen während der Rückfahrt geschnitten wird. Zurück am Hauptantrieb hebt der Walzenlader den vorlaufenden Tragarm an und fährt mit einem Vollschnitt in den Bereich des Antriebs hinein.

Der Vorteil des Teilöffnungsverfahrens ist wie beim PaWeb die Verringerung der Fläche in Verhiebrichtung, was sich bei hartem Material günstig auf den Andruck auswirkt. Zudem sind hierbei auch nur zwei Richtungswechsel nötig, so dass die Strebrandoperation relativ geringen zeitlichen Anteil am Gesamtzyklus hat. Besonders positiv be-

¹⁷ Zitat: „...this is a uni-directional cutting because in one round trip it cuts a full web width of coal.“ [PENG_2006, S.298]

merkbar macht sich das bei den kurzen Streblängen Matlas von ca. 150 m [NIENHAUS et al._2003].

10 Schritte im Teilöffnungsverfahren



Teilöffnungsverfahren

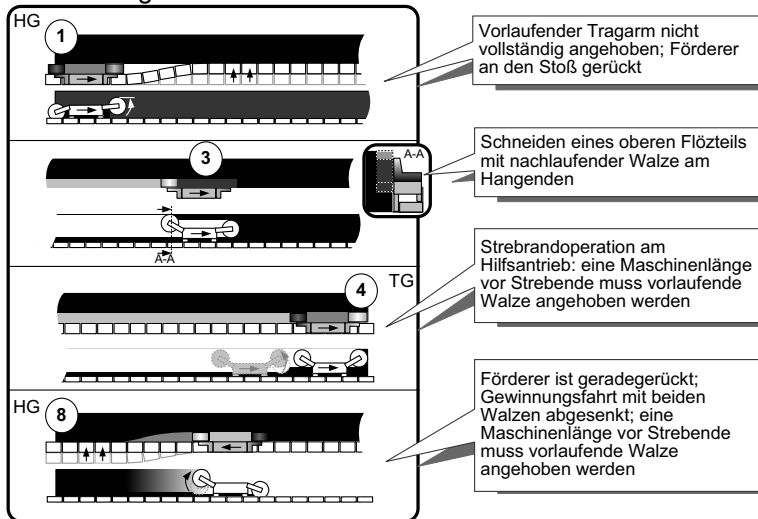


Abbildung 2-15: Prinzipskizze in Draufsicht und Seitenansicht des Teilöffnungsverfahrens

Der größte Nachteil des Verfahrens liegt wie beim PaWeb in der Gewinnungsleistung, sofern die Maschine mit gleicher Geschwindigkeit wie beim Bi-di fährt. Ebenso bietet dieses Verfahren keine Möglichkeit, einen zu schwachen Schneidmotor zu kompensieren, weil auf der ersten Fahrt immer die vorlaufende Walze voll im Eingriff ist. Das führt zu einer unterschiedlichen Belastung der Walzen.

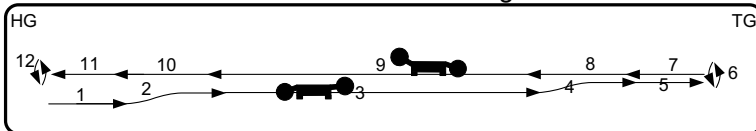
Variationen dieses Schnittverfahrens gibt es bezüglich der Tragarmstellung auf der Hinfahrt. Es ist denkbar, dass dabei der vorlaufende Tragarm oben und der nachlaufende Tragarm in mittlerer Position schneidet, wobei es sich dann um die gleiche Bewegung wie beim Uni-di „backward snake“ mit Start am Hauptantrieb handelt. Ebenso

kann der Einschneidevorgang aus Gründen der Bewetterung und dem damit zusammenhängenden Vorteil für den Arbeitsschutz am anderen Ende des Strebs erfolgen.

2.3.6 Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren

Die Kombination aus den beiden vorangegangenen Verfahren ist das Teilschnitt-Teilöffnungsverfahren (PaWeb-PaOpen) oder Twentymile-Verfahren. Hierbei werden die Hauptmerkmale des Teilschnitt- und des Teilöffnungsverfahrens vereint, indem auf der Bergfahrt die Maschine bei verringerter Schnitttiefe und ebenso verringerter Schneidhöhe fährt (Abbildung 2-16) und auf der Talfahrt den Rest gewinnt. Der Walzenlader fährt am Haupt- und am Hilfsantrieb über den jeweils nur teilweise abgewinkelten Förderer mit nicht ganz angehobener, vorlaufender Walze in den Stoß hinein. Wenn der Hilfsantrieb erreicht wird, schneidet der Walzenlader vollständig in den Stoß ein und hebt den vorlaufenden Tragarm an, damit auch hier, wie beim PaOpen, keine Kohle über dem Maschinenkörper verbleibt.

12 Schritte im Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren



Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren

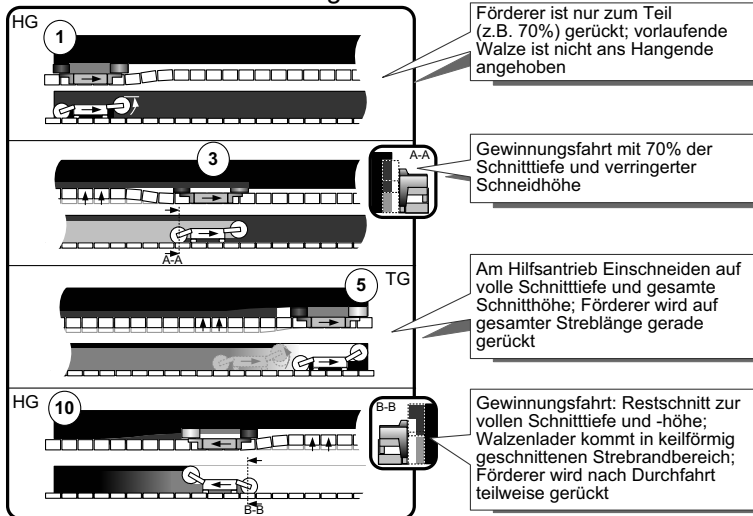


Abbildung 2-16: Prinzipskizze in Draufsicht und Seitenansicht vom Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren

Weil das Verfahren mit reduzierten Schnittiefen arbeitet, ist es auf hohe Marschgeschwindigkeiten des Walzenladers angewiesen, um eine hohe Gewinnungskapazität zu erreichen. In dem Beispiel der Twentymile Mine fährt der Walzenlader mit extrem hohen Marschgeschwindigkeiten von 36-45 m/min. Der Grund für die Entwicklung dieses Verfahrens sind hohe Spannungen im Stoß, die zu spontanen Ausbrüchen der Kohle bis in den Fahrweg führen können. Mit dieser Methode wurde ein Weg gefunden, Spannungen durch einen Entlastungsschnitt zu beherrschen [PENG_2006, S.296f].

Das Schnittverfahren besitzt darüber hinaus den Vorteil der individuellen Anpassung der Schneidhöhe und Schnittiefe während des ersten Schnitts zugunsten eines ausgeglichenen Förderstroms. Lücken entstehen kaum, da nur zwei Richtungswechsel im Schneidzyklus stattfinden. RUTHERFORD beschreibt, dass die unten präsentierten Varianten dieses Verfahrens in australischen Streben mit großer Mächtigkeit zum Einsatz kommen und dabei einen auf Berg- und Talfahrt ausbalancierten Förderstrom erzeugen [RUTHERFORD_2008]. Durch die hohe Flexibilität kann sich dieses Verfahren gut an Restriktionen anpassen.

Obwohl in der guten Anpassungsfähigkeit dieses Schnittverfahrens ein Vorteil liegt, ist dieser Umstand im manuellen Betrieb ein Nachteil. Dadurch, dass Schneidhöhe und Schnittiefe variabel eingestellt werden können, wirkt die Methode in der manuellen Handhabung kompliziert. Ein hoher Schulungsaufwand für die Strebmansschaft ist notwendig. Im Hinblick auf einen steigenden Automatisierungsgrad in der Walzenladertechnik erlangt dieses Verfahren aber zunehmend an Bedeutung, sofern Steuerungsrechner aufgrund von Sensorinformationen das Schnittverfahren an die Gegebenheiten optimal anpassen.

Variationen bei diesem Verfahren ergeben sich neben der Einstellung der verschiedenen Schnittiefen und -höhen durch das Stehen lassen von Material sowohl am Hangenden als auch am Liegenden (Abbildung 2-17). Erst bei der Rückfahrt wird das obere und untere Material hereingewonnen, was sich „Kaiser Cut“¹⁸, bzw. „Variable Web Kaiser Cut“ nennt. Wird zuerst der untere Teil mit voller Schnittiefe und halben Unterschnitt und danach der obere Teil des Flözes mit verringerter Schnittiefe geschnitten, bezeichnet RUTHERFORD das Verfahren als „Variable Web Uni-di Variant“ [RUTHERFORD_2008].

¹⁸ Verfahren vermutlich nach dem Erfinder benannt [RUTHERFORD_2008]

Variation des Teilschnitt- u. Teilöffnungsverfahrens: Kaiser Cut

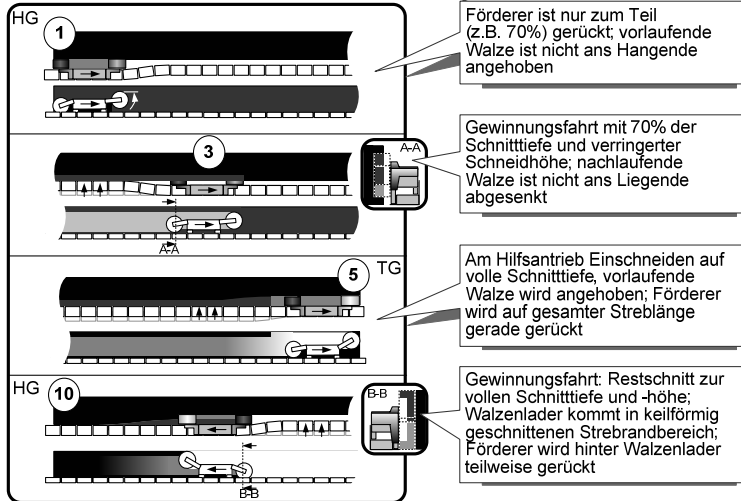


Abbildung 2-17: Variation des Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahrens: Kaiser Cut

Variation des Teilschnitt- u. Teilöffnungsverfahrens: Variable Web Uni-di Variant

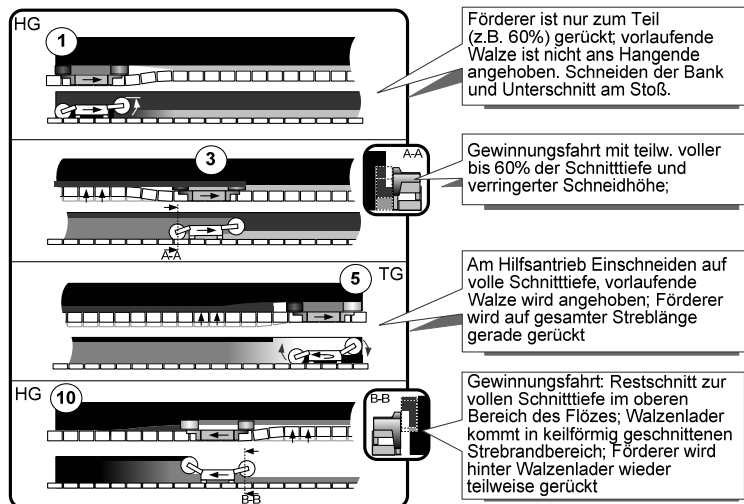


Abbildung 2-18: Variation des Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahrens: Variable Web Uni-di Variant

2.4 Walzenlader-Schnittverfahren im Vergleich

Ein konkreter Vergleich von Walzenlader-Schnittverfahren ist nur bei festgelegten Rahmenbedingungen möglich. Einhergehend mit veränderten Voraussetzungen fallen die Ergebnisse eines Vergleichs entsprechend unterschiedlich aus. Es gibt demnach nicht das pauschal beste oder das schlechteste Schnittverfahren, sondern für jeden individuellen Streb ist eine eigene Überprüfung nach der am besten geeigneten Methode durchzuführen. Trotz dieser individuellen Resultate lassen sich Gesetzmäßigkeiten erkennen, die die Schnittverfahren charakterisieren. In dem hier durchgeführten Vergleich (Abbildung 2-19) werden allgemeingültige Tendenzen aufgezeigt und demnach Bewertungen durchgeführt. Ein kleiner Balken deutet auf einen schlechten Effekt, ein voller Balken auf einen guten.

- Komplexität

Das einfachste Schnittverfahren ist das Uni-di, welches sich durch nur eine Hauptschneidrichtung mit voller Schneidhöhe und Schnitttiefe und eine Räumfahrt in die Gegenrichtung auszeichnet. Das Bi-di ist wegen der Schleifenfahrten an beiden Strebenden komplizierter und am komplexesten ist das PaWeb-PaOpen durch seine vollständige Parametrierbarkeit sowohl in Schnitttiefe als auch Gewinnungshöhe.

- Streblängen

Bei kurzen Streblängen erweisen sich die Verfahren als am besten, die wenige Richtungswechsel und geringe unproduktive Strebrandoperationen beinhalten. Das Bi-di kann somit seine Leistung mit zunehmenden Streblängen ausspielen, weil sich der relative Anteil der Schleifenfahrten an den Gesamtfahrten verringert (vergl. Beispielszenario in Kapitel 4). Durch den Vollschnitt ist der Förderer relativ voll beladen, weshalb dieser Vorteil nur so lange gilt, wie die FördererMotoren keine Begrenzung darstellen. Danach zeichnen sich wieder die Verfahren aus, die eine geringere und gleichmäßigere Beladung hervorruhen.

- Durchschnittliche Marschgeschwindigkeit und Zykluszeit

Das Kriterium Marschgeschwindigkeit bezieht sich darauf, ob ein Verfahren eine geringe Marschgeschwindigkeit haben kann und trotzdem hohe Gewinnungskapazitäten erzielt. Das Bi-di ist am besten für geringe Geschwindigkeiten geeignet, während die Verfahren mit variierender Schnitttiefe bzw. Schneidhöhe hohe Geschwindigkeiten fahren müssen, um bei fast doppeltem Fahrweg die gleichen oder höhere Kapazitäten zu erreichen. Wird z. B. die Marschgeschwindigkeit auf 15m/min beschränkt, dann ist das Bi-di mit Abstand das beste Verfahren. Bei einer Erhöhung der maximal möglichen

2 Systembeschreibung

Marschgeschwindigkeit auf 40 m/min können das PaWeb und das PaWeb-PaOpen ihre Potenziale ausschöpfen und erbringen bessere Resultate als das Bi-di.

	Komplexität komplex ↔ einfach	vorteilhaft bei Streblängen kurz ↔ lang	kleine durch- schn.- v_M^1 schnell ↔ langsam	Zykluszeiten v_M klein ² lang ↔ kurz	Zykluszeiten v_M groß ³ lang ↔ kurz
Bi-Di				37 min	35 min
Uni-Di				58 min	38 min
PaOpen				60 min	36 min
PaWeb				57 min	32 min
PaWeb-PaOpen				57 min	32 min
	Ø Gew.- kapazität ⁴ gering ↔ hoch	geeignet für harte Kohle weich ↔ hart	Förderer- beladung variierend ↔ ausgegl.	Knäpper- vermeidung viele Kn. ↔ wenige Kn.	Hangend- unterstützung langsam ↔ schnell
Bi-Di					
Uni-Di					
PaOpen					
PaWeb					
PaWeb-PaOpen					

Legende: ¹ v_M = Marschgeschwindigkeit des Walzenladers
 schlecht ↔ gut
² eine Schnitttiefe bei 400m Streblänge, 2,5m Flözmächtigkeit, 15m/min max. mögl. v_M
³ eine Schnitttiefe bei 400m Streblänge, 2,5m Flözmächtigkeit, 40m/min max. mögl. v_M
⁴ bei hohem Automatisierungsgrad

Abbildung 2-19: Vergleich der Walzenlader-Schnittverfahren mit ausgesuchten Kriterien

- Gewinnungskapazität

Dieses Kriterium bezieht sich auf den vorangegangenen Punkt und setzt einen hohen Automatisierungsgrad und hohe mögliche Marschgeschwindigkeiten der Maschine voraus. Werden die Zykluszeiten in Bezug zur gelösten Masse gesetzt ergeben sich die höchsten Kapazitäten für das PaWeb und das PaWeb-PaOpen.

- Kohlenhärte

Eine große Kohlenhärte wirkt sich negativ auf die Verfahren aus, die im Vollschnitt abbauen. Deshalb sind das Bi-di und Uni-di schlecht für harte Kohle geeignet. Die

2 Systembeschreibung

Methoden, die sich durch Variation der Schneidhöhe und Schnitttiefe bestmöglich an die gegebenen Motorleistungen anpassen können, haben einen Vorteil.

- Ausgeglichene Fördererbeladung

Durch die vielen Richtungswechsel im Bi-di entstehen viele Lücken im Förderstrom. Beim Uni-di erbringt die Räumfahrt eine im Gegensatz zur Gewinnungsfahrt nur kleine Leistung. Die anderen Verfahren erzeugen durch die Variationen in der Schnitttiefe und Schneidhöhe in Verbindung mit wenigen Richtungswechseln einen relativ ausgeglichenen Massenstrom.

- Knäppervermeidung

Die Verfahren, die im Vollschnitt schneiden, neigen eher zur Verursachung von Knäppern.

- Hangendunterstützung

Das Bi-di schneidet gleichzeitig das Hangende und Liegende frei, so dass es schnell das Hangende mit dem vorrückenden Schildausbau unterstützen kann. Varianten des PaWeb-PaOpen finden Anwendung in Zonen mit ungünstigen Hangendverhältnissen [LANGE_2007-2], weil durch die halbe Schnitttiefe das Hangende besser zu beherrschen ist.

*„Man muss schon etwas wissen,
um verbergen zu können,
dass man nichts weiß.“*

Marie von Ebner-Eschenbach (1830-1916), österreichische Schriftstellerin

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

Dieses Kapitel behandelt die Struktur des Berechnungs- und Simulationsalgorithmus sowie in Ansätzen die Umsetzung in der Tabellenkalkulationssoftware Excel. Zuerst befasst sich das Kapitel mit dem allgemeinen Algorithmus, der ausgehend von den einzelnen Walzenladerschritten eine durchschnittliche Gewinnungskapazität in Tonnen pro Stunde errechnet. Anschließend wird beschrieben, wie aus der stundenbezogenen Kapazität eine Jahreskapazität prognostiziert wird. Im Besonderen geht das Kapitel auf die Größen des Systems ein, die begrenzenden Einfluss auf die Marschgeschwindigkeit des Walzenladers haben und wie sich anhand dieser Größen eine mögliche Marschgeschwindigkeit des Walzenladers errechnet.

Danach stellt das Kapitel zwei Erweiterungen des allgemeinen Algorithmus vor:

- Die Simulation von Massenströmen aus dem Abbau
- Zwei gleichzeitig laufende Strebbetriebe

Jeweils werden die Hintergründe und die Ziele der Erweiterungen und ihre Funktionsweise angegeben. Beispielrechnungen und -szenarien befinden sich dazu im Anhang.

3.1 Allgemeiner Algorithmus für Strebbau mittels Walzenlader

Die als „Production Simulation of Shearer and Longwall Operations“ (ProSL) bezeichnete Simulation ist ein auf Excel basierender Algorithmus, welcher Systemgleichungen kombiniert und in diskreten Abschnitten aus den Walzenladeraktionen Massenströme über die Zeit errechnet.

Diese Art der Abbausimulation haben BAYER im Jahr 2000 [BAYER_2000] und darauf aufbauend BUSSMANN im Jahr 2001 [BUSSMANN_2001] in Anfängen begonnen, bevor im Rahmen dieser Arbeit die detaillierte Simulation von Walzenladerstrebbetrieben entwickelt wurde.

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

Die Grundidee der Simulation besteht in der Berechnung der gelösten Masse pro Verfahrensschritt, die in Relation zur dafür benötigten Zeit gesetzt wird. Die Aufteilung der Verfahrensschritte erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Tragarmstellungen, der Bewegungsrichtungen des Walzenladers, der Aktionen bei einem Richtungswechsel und der anstehenden Geometrie des jeweiligen Flözabschnitts. Aneinandergereiht ergeben die Schritte einen gesamten Abbauzyklus eines Schnittverfahrens, für den die gewonnene Masse in Bezug zur Dauer gesetzt wird. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Kapazität für einen Abbauzyklus, bestehend aus Berg- und Talfahrt des Walzenladers. Anhand dieser berechneten, theoretischen Gewinnungskapazität kalkuliert der Algorithmus mit Angaben über Arbeitszeiten und Verfügbarkeit der Maschinenteknik monatliche und jährliche Förderzahlen.

Bei der in den modellierten Schnittverfahren gewählten Detailstufe ergeben sich im Bi-di 22 Berechnungsschritte inklusive zwei optionaler Pausen nach den Gewinnungsfahrten, wonach der Walzenlader wieder seine Ausgangsposition erreicht hat. Abbildung 3-1 zeigt zum einen die Unterteilung des Bi-di in Verfahrensschritte und zum anderen den damit zusammenhängenden tabellarischen Aufbau des Berechnungsalgorithmus. Zur Verdeutlichung der Tabelle ist Schritt drei sowohl in der Darstellung der Walzenladerbewegung als auch in der Tabelle exemplarisch markiert.

Der Berechnungsalgorithmus liefert für jeden Verfahrensschritt die theoretisch zu lösenden Volumina der vorlaufenden und nachlaufenden Walze. Schneidet der Walzenlader im Vollschnitt, dann ergibt sich das gelöste Volumen und daraus die gelöste Masse aus der Gleichung 1. Bei der Umrechnung des Volumens auf die Masse rechnet das System mit der gemittelten Dichte des geschnittenen Blocks, die aus der anteiligen Kohlendichte und der anteiligen Nebengesteinsdichte besteht. Die resultierende Masse ist die, die während des betrachteten Verfahrensschritts auf den Strebförderer gelangt.

$$m_{G'} = l_S \cdot b_G \cdot (H_{SVor} + H_{SNach}) \cdot \rho_F \quad (1)$$

$m_{G'}$ = gewonnene Masse eines Verfahrensschritts [t]

l_S = Länge des Verfahrensschritts [m]

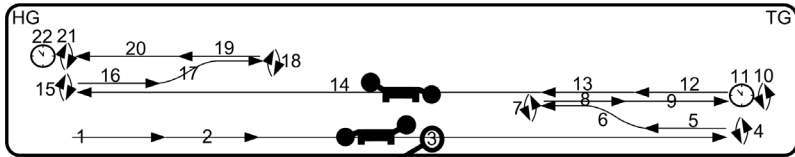
b_G = Gewinnungsbreite [m]

H_{SVor} = Schneidhöhe der vorlaufenden Walze [m]

H_{SNach} = Schneidhöhe der nachlaufenden Walze [m]

ρ_F = gemittelte Festdichte des Blocks $\left[\frac{t}{m^3} \right]$

22 Schritte im Bi-di Schnittverfahren inkl. Pausen am Strebrand



Auszug aus der Umsetzung in Excel

	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Production Calculation	Total					
2		Bi-di	Time line	Time	Travel	Distance	Speed	Output
3		2,20 m Extraction Height	[min]	[min]	direction	[m]	[m/min]	[t/h]
4	1	Floor cut (machine length)	15,00	1,20	TG	12,00	10,00	656
5	2	Cutting through snake at HG	16,20	1,40	TG	14,00	10,00	0
6	3	Cut from Head Gate to Tail Gate	17,60	31,73	TG	312,52	9,85	2476
7	4	Swivelling of the ranging arms	49,33	2,5				
8	5	Floor cut (machine length)	51,83	1,20	HG	12,00	10,00	1585
9	6	Cutting through snake at TG	53,03	1,48	HG	14,00	9,46	1943
10	7	Swivelling of the ranging arms	54,51	2,50				
11	8	Floor cut (machine length)	57,01	1,20	TG	12,00	10,00	1585
12	9	Cutting through snake at TG	58,21	1,40	TG	14,00	10,00	2053
13	10	Swivelling of the ranging arms	59,61	2,5				
14	11	Downtime after 1st pass	62,11	0,00				
15	12	Floor cut (machine length)	62,11	1,20	HG	12,00	10,00	656
16	13	Cutting through snake at TG	63,31	1,40	HG	14,00	10,00	0
17	14	Cut from Tail Gate to Head Gate	64,71	37,55	HG	312,52	8,32	2071
18	15	Swivelling of the ranging arms	102,27	2,5				
19	16	Floor cut (machine length)	104,77	1,20	TG	12,00	10,00	1585
20	17	Cutting through snake at HG	105,97	1,40	TG	14,00	10,00	2053
21	18	Swivelling of the ranging arms	107,37	2,5				
22	19	Floor cut (machine length)	109,87	1,20	HG	12,00	10,00	1585
23	20	Cutting through snake at HG	111,07	1,48	HG	14,00	9,46	1943
24	21	Swivelling of the ranging arms	112,55	2,50				
25	22	Downtime after 2nd pass	115,05	0,00				

Abbildung 3-1: Unterteilung eines Schnittverfahrens in diskrete Schritte, hier: Bi-di

Um von der Masse zur Gewinnungskapazität (Abbildung 3-1, Spalte I) umzurechnen, muss die Zeit in die Rechnung einfließen (Abbildung 3-1, Spalte E), die der Walzenlader für diesen Verfahrensschritt benötigt. Die Zeit ist abhängig von der Marschgeschwindigkeit des Walzenladers (Abbildung 3-1, Spalte H) und der Distanz des Verfahrensschritts (Abbildung 3-1, Spalte G).

Weil verschiedene Systemgrößen begrenzend auf die Marschgeschwindigkeit des Walzenladers wirken können, prüft der Berechnungsalgorithmus, welche der Größen für den Verfahrensschritt einen Engpass darstellen. Die daraus resultierende Marschgeschwindigkeit wird dann für die Bestimmung der Zeit herangezogen.

Größen, die geprüft werden, sind:

- Manuelle Begrenzung der Marschgeschwindigkeit
- Schneidmotorleistung der rechten Walze

- Schneidmotorleistung der linken Walze
- Gesamte installierte Windenleistung
- Tunnelquerschnitt unter dem Maschinenkörper
- Ladequerschnitt des Strebförderers
- Abförderkapazität nachgeschalteter Fördermittel
- Gesamte installierte Motorleistung des Strebförderers

3.1.1 Manuelle Begrenzung der Marschgeschwindigkeit

Aufgrund von bergbehördlichen Auflagen oder unter für Maschinenfahrer schwierigen Bedingungen von niedrigen Mächtigkeiten ist eine manuelle Begrenzung der Walzenladergeschwindigkeit nötig [BUSSMANN_2001, S.29]. Dieser, vom Benutzer in die Simulation eingegebene Wert, wird mit den berechneten, technisch möglichen Geschwindigkeiten verglichen und fließt in die Geschwindigkeits- und Zeitberechnung für einen Verfahrensschritt ein.

3.1.2 Schneidmotorleistung

In Abhängigkeit von der Fahrtrichtung ist abwechselnd die rechte oder die linke die jeweils vorlaufende Walze, welche mit vollem Durchmesser schneidet. Die nachlaufende Walze muss in den meisten Situationen weniger schneiden, hat aber mehr Ladearbeit zu verrichten. Zusätzlich ergibt u. U. die schlechte Einsehbarkeit für den Maschinenbediener an der Grenze zum Liegenden eine höhere Stromaufnahme des Schneidmotors als bei der vorlaufenden Walze, da die Meißel bei ungenauem Schnitt ins Liegende einschneiden.

Die wichtigste Größe in der Gleichung 2 ist die spezifische Kohlenhärte. Sie ist ein empirisch ermittelter Wert und spiegelt den spezifischen Energieverbrauch wieder, der nötig ist, um einen Kubikmeter einer bestimmten Kohle zu schneiden und zu laden. Mit steigender spezifischer Schneid- und Ladearbeit wird die mögliche Marschgeschwindigkeit der Maschine geringer. Dem Unterschied zwischen vor- und nachlaufender Walze in Bezug auf Schneid- und Ladearbeit wird mit einem Korrekturfaktor in der jeweiligen Formel Rechnung getragen.

$$v_{MS} = \frac{P_s \cdot \eta}{H_s \cdot T_s \cdot w_c \cdot f_{VN} \cdot 60} \quad (2)$$

v_{MS} = Marschgeschwindigkeit aufgrund Schneidleistung $\left[\frac{m}{min}\right]$

P_S = nominale Schneidleistung eines Schneidmotors [kW]

η = Wirkungsgrad Schneideinheit

H_S = Schneidhöhe [m]

T_S = Schnitttiefe [m]

w_C = Spezifische Kohlenhärte $\left[\frac{kWh}{m^3}\right]$

f_{VN} = Korrekturfaktor für vor - oder nachlaufende Walze

3.1.3 Leistung der Windenmotoren

Die Windenmotoren eines Walzenladers sorgen für den Vorschub der Maschine. Dabei muss immer die Reibung und bei Bergfahrt zusätzlich die Hangabtriebskraft überwunden werden (Gleichung 3 und Gleichung 4). Bei Talfahrt unterstützt die Hangabtriebskraft den Maschinenvorschub. Der Rest der bereitgestellten Kraft steht für den Andruck der Maschine an den Stoß in Fahrtrichtung zur Verfügung. Die für die Kohle benötigte Kraft errechnet sich im Bi-di vereinfacht aus dem Produkt der gesamten Schneidhöhe, Schnitttiefe und der spezifischen Andruckkraft λ_A [kN/m²] der Kohle. Die spezifische Andruckkraft ist eine flächenbezogene, lagerstättenabhängige Größe. Im Vollschnitt bei großen Gewinnungshöhen ist die Fläche in Verhiebrichtung groß und erfordert somit eine größere Andruckkraft. Wenn dann zusätzlich durch hohe Reibung oder starker Anstieg im Streb nicht genügend Kraft am Stoß zu Verfügung steht, muss die Maschine ihre Geschwindigkeit verringern. Mit ansteigender spezifischer Andruckkraft verringert sich die mögliche Marschgeschwindigkeit des Walzenladers.

$$v_{MA} = \frac{P_W}{F_R \pm F_H + F_A} \quad (3)$$

+ = Bergfahrt

- = Talfahrt

v_{MA} = mögliche Marschgeschwindigkeit aufgrund Andruckkraft $\left[\frac{m}{min}\right]$

P_W = nominale Gesamtwindenleistung [kW]

F_R = Reibkraft, die die Maschine überwinden muss [kN]

F_H = Hangabtriebskraft [kN]

F_A = nötige Andruckkraft [kN]

$\Leftrightarrow$

$$v_{MA} = \frac{P_W \cdot \eta_W \cdot 60}{F_G \cdot (\mu_W \cdot \cos \alpha \pm \sin \alpha) + T_S \cdot H_S \cdot \lambda_A} \quad (4)$$

+ = Bergfahrt

- = Talfahrt

 v_{MA} = mögliche Marschgeschwindigkeit aufgrund Andruckkraft $\left[\frac{m}{min}\right]$ P_W = nominale Gesamtwindenleistung [kW] η_W = Wirkungsgrad der gesamten Vorschubeinheit F_G = Gewichtskraft des Walzenladers [kN] μ_W = Widerstandsbeiwert des Walzenladers α = Steigung des Strebs vom Hauptantrieb zum Hilfsantrieb $[\circ]$ T_S = Schnitttiefe [m] H_S = Schneidhöhe [m] λ_A = spezifische Andruckkraft $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$

3.1.4 Größe des Tunnelquerschnitts

Der Tunnelquerschnitt eines Walzenladers ist die Fläche, die vom Maschinenkörper sowohl oben als auch seitlich und unten vom Strebförderer eingegrenzt wird (Abbildung 2-3). Diese Fläche wirkt dann einschränkend auf die Marschgeschwindigkeit, wenn die jeweilige Walze viel Material schneidet, und es beim Abfördern unter den Maschinenkörper gelangt. Bei der Bergfahrt ist das Material der vorlaufenden Walze entscheidend, bei der Talfahrt ist es das der nachlaufenden, dessen Volumen sich u. a. aus der Schneidhöhe ergibt. Auf Bergfahrt entspricht sie dem Walzendurchmesser, auf Talfahrt im Bi-di ist das die Resthöhe, die von der vorlaufenden Walze stehen gelassen wird. Mit kleiner werdendem Tunnelquerschnitt verringert sich die mögliche Marschgeschwindigkeit der Maschine (Gleichung 5).

$$v_{MT} = \frac{v_{AFC} \cdot A_T}{T_S \cdot H'_S \cdot S \mp A_T} \quad (5)$$

- = Bergfahrt

+ = Talfahrt

 v_{MT} = mögliche Marschgeschwindigkeit aufgrund des Tunnelquerschnitts $\left[\frac{m}{min}\right]$ v_{AFC} = Förderergeschwindigkeit $\left[\frac{m}{min}\right]$ A_T = Tunnelquerschnitt unter Walzenlader $[m^2]$ T_S = Schnitttiefe [m] H'_S = Schneidhöhe der relevanten Walze [m] S = Schüttfaktor, Verhältnis von Lockervolumen zu Festvolumen

3.1.5 Beladungsquerschnitt des Strebförderers

Ein Strebförderer besitzt einen maximalen Beladungsquerschnitt, der von der Rinnenbreite und der Brackenhöhe abhängt. Bei der Formel zur Berechnung der möglichen Marschgeschwindigkeit ist die Beladungsgeschwindigkeit zu beachten, die sich aus der Vektordifferenz der Förderer- und der Walzenladergeschwindigkeit ergibt (Gleichung 6). Das bedeutet, dass sich die Beladungsgeschwindigkeit durch die Fahrtrichtung des Walzenladers erheblich verändert. Auf Bergfahrt ist sie hoch, weil die Betriebsmittel gegenläufig sind, so dass sich ein kleiner Beladungsquerschnitt auf dem Förderer einstellt. Bei Talfahrt fährt der Walzenlader in Abförderrichtung. Der daraus resultierende Beladungsquerschnitt ist bei gleichbleibender Maschinengeschwindigkeit größer als bei der Bergfahrt.

$$v_{MF} = \frac{v_{AFC} \cdot 60 \cdot A_{AFC}}{T_S \cdot H_S \cdot S \mp A_{AFC}} \quad (6)$$

– = Bergfahrt

+ = Talfahrt

v_{MF} = mögliche Marschgeschwindigkeit aufgrund des Fördererquerschnitts $\left[\frac{m}{min}\right]$

v_{AFC} = Förderergeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$

A_{AFC} = Fördererquerschnitt $[m^2]$

T_S = Schnitttiefe $[m]$

H_S = gesamte Schneidhöhe $[m]$

S = Schüttfaktor, Verhältnis von Lockervolumen zu Festvolumen

3.1.6 Abförderkapazität nachgeschalteter Fördermittel

Fördermittel mit niedrigen Förderkapazitäten, die zwischen Strebförderer und der Aufbereitung in der Förderkette stehen, können begrenzend wirken. Der Walzenlader muss bei Bedarf seine Geschwindigkeit an die Kapazität dieser Fördermittel anpassen. Da die auf den Förderer geladene Kapazität je nach Berg- oder Talfahrt des Walzenladers unterschiedlich ist, muss die Fahrtrichtung des Walzenladers Berücksichtigung finden (Gleichung 7). Grundsätzlich sollte das Prinzip des größer werdenden Flaschenhalses gelten, d. h. die Kapazitäten eines nachfolgenden Fördermittels sollen größer sein als die des vorhergehenden.

$$v_{MC} = \frac{v_{AFC} \cdot \dot{C}_{max} \cdot \frac{1}{60}}{v_{AFC} \cdot H_S \cdot T_S \cdot \rho_F \mp \dot{C}_{max} \cdot \frac{1}{3600}} \quad (7)$$

– = Bergfahrt

+ = Talfahrt

v_{MC} = mögliche Marschgeschwindigkeit aufgrund Förderkapazität $\left[\frac{m}{min}\right]$

v_{AFC} = Förderergeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\dot{C}_{max}$ = Förderkapazität nachgeschalteter Fördermittel $\left[\frac{t}{h}\right]$

H_S = gesamte Schneidhöhe [m]

T_S = Schnitttiefe [m]

ρ_F = gemittelte Festdichte des zu schneidenden Blocks $\left[\frac{t}{m^3}\right]$

3.1.7 Gesamte installierte Motorleistung des Strebförderers

Unter Umständen kann die Motorleistung des Strebförderers nicht ausreichend dimensioniert sein, um einen über die gesamte Streblänge vollgeladenen Förderer zu bewegen. Auf der Bergfahrt Richtung Hilfsantrieb lädt der Walzenlader zunehmend Masse auf den Förderer. Erreichen dabei die Förderer Motoren einen vorab definierten kritischen Bereich von ca. 95 % der maximalen Stromaufnahme, regelt das installierte Überwachungssystem automatisch die Marschgeschwindigkeit des Walzenladers auf vom Benutzer festgelegte Werte runter (z. B. 50 % und danach 30 % der Maximalgeschwindigkeit). Dadurch erhöht sich die Gesamtbeladung auf dem Strebförderer nicht weiter, weil der Walzenlader bei gedrosselter Geschwindigkeit nicht mehr auf den Strebförderer lädt als der Förderer am Hauptantrieb auf das nächste Fördermittel abgibt.

Der Berechnungsalgorithmus ermittelt die Kapazität bei Bergfahrt annäherungsweise. Dazu bestimmt der Algorithmus zunächst die kritische Beladungslänge l_{crit} [m] (Gleichung 8). Das ist die Distanz vom Hauptantrieb bis zur Walzenladerposition im Streb, bei der die maximal zulässige Beladung auf dem Förderer liegt. Bis zu dem Punkt kann der Walzenlader mit einer Marschgeschwindigkeit aufgrund einer der o. g. Begrenzungen fahren. Ist die kritische Beladungslänge erreicht, entsprechen die Bewegungswiderstände des Kettenbands zuzüglich des Bewegungswiderstands der darauf liegenden Beladung der Gesamtkraft, aufgebracht durch die Fördererantriebe.

$$l_{crit,B} = \frac{\frac{P_{AFC} \cdot \eta_{AFC}}{v_{AFC}} - F_{Ko} - F_{Ku}}{(c_B \cdot \cos \alpha - \sin \alpha) \cdot f_K \cdot q_{B,B}} \quad (8)$$

$l_{\text{crit,B}}$ = kritische Beladungslänge bei Bergfahrt [m]

P_{AFC} = installierte Gesamtleistung am Förderer [kW]

η_{AFC} = Wirkungsgrad der Förderergetriebe

v_{AFC} = Förderergeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

$F_{\text{Ko,Ku}}$ = nötige Kräfte, um Obertrum und Untertrum des Kettenbands zu ziehen [kN]

c_B = Widerstandsbeiwert der Beladung

α = Einfall des Strebs $[\circ]$

f_K = Faktor zur Erhöhung der Reibkräfte aufgrund von Fördererabwinkelung

$q_{B,B}$ = spezifische Last der Beladung bei Bergfahrt $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}}\right]$

Wenn die kritische Beladungslänge kleiner als die Streblänge ist (Abbildung 3-2, b), berechnet der Algorithmus eine Pausenzeit, die der Walzenlader mindestens warten muss, damit er mit gleicher Marschgeschwindigkeit bis zum Hilfsantrieb weiterfahren kann (Abbildung 3-2, c), ohne erneut mehr als die kritische Masse auf den Strebförderer zu laden (Abbildung 3-2, d).

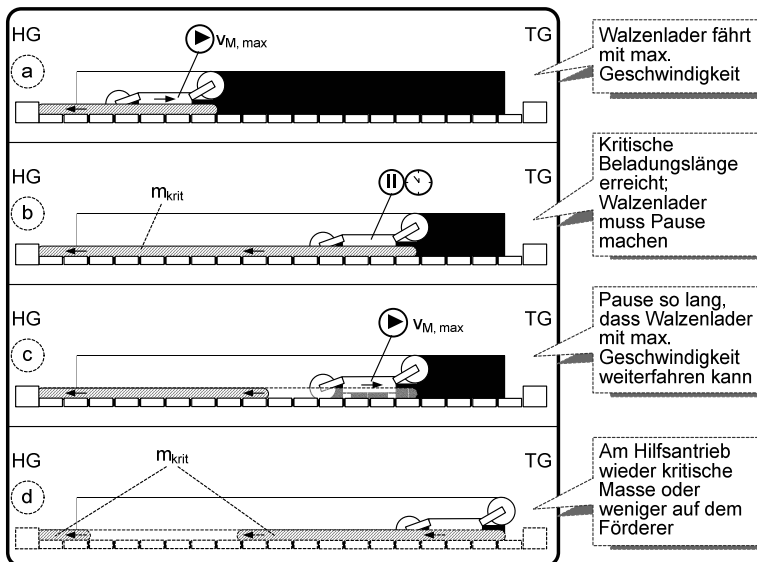


Abbildung 3-2: Simulation der Bergfahrt bei Begrenzung durch Förderermotoren

Bei sehr geringer Fördererleistung wäre die kritische Beladungslänge so kurz, dass der Walzenlader bei Weiterfahrt mehrfach anhalten müsste. Eine Plausibilitätsprüfung erfordert deshalb eine Mindestmotorleistung, die so hoch ist, dass es nicht zu weiteren

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

Unterbrechungen der Fahrt kommt. Zur Ermittlung der Gewinnungskapazität rechnet der Algorithmus (Gleichung 9) die durchschnittliche Geschwindigkeit des Verfahrensschritts aus.

$$v'_M = \frac{l_s}{\frac{l_s}{v_M} + t_p} \quad (9)$$

v'_M = Durchschnittsgeschwindigkeit mit eingerechneter Pause $\left[\frac{m}{\min}\right]$

l_s = Länge des Verfahrensschritts [m]

v_M = Marschgeschwindigkeit der Maschine aufgrund anderer Restriktionen $\left[\frac{m}{\min}\right]$

t_p = Pause in der Walzenladerfahrt [min]

Bei der Talfahrt des Walzenladers sind andere Berechnungen als bei der Bergfahrt durchzuführen. Bei der Bergfahrt verlässt geladenes Material unmittelbar den Strebförderer. Dadurch kann der Walzenlader eine größere Distanz als bei der Talfahrt zurücklegen. Auf der Talfahrt bewegt der Strebförderer die geladene Masse vor dem Walzenlader her. Die Berechnung der zulässigen Fahrlänge ergibt sich hierbei aus der Länge der kritischen Masse im unverritzten Stoß (Gleichung 10), d.h. erst wenn der Walzenlader im Streb die kritische Masse geschnitten hat, kann sie auf dem Förderer zu einer begrenzenden Situation führen (Abbildung 3-3).

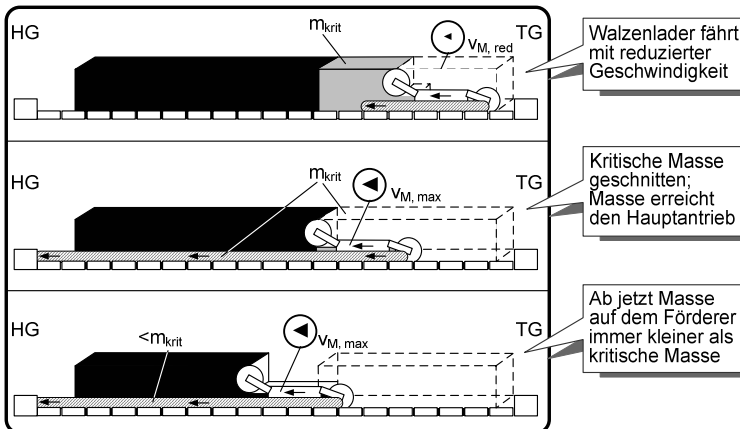


Abbildung 3-3: Simulation der Talfahrt bei Begrenzung durch Förderermotoren

$$l_{\text{crit,SL}} = \frac{l_{\text{crit,T}} \cdot A_{\text{AFC,T}}}{S \cdot T_S \cdot H_S} \quad (10)$$

$l_{\text{crit,SL}}$ = kritische Fahrlänge des Walzenladers bei Talfahrt [m]

$l_{\text{crit,T}}$ = kritische Beladungslänge bei Talfahrt [m]

$A_{\text{AFC,T}}$ = Beladungsquerschnitt des Förderers bei Talfahrt [m²]

H_S = gesamte Schneidhöhe [m]

T_S = Schnitttiefe [m]

S = Schüttfaktor, Verhältnis von Lockervolumen zu Festvolumen

Es ist zu prüfen, welches Ereignis eher stattfindet (Gleichung 11):

- Erreicht der Walzenlader zuerst die Position im Streb, so dass er die kritische Masse auf den Förderer geladen hat (Fall 1) oder
- hat in der Zwischenzeit der Materialstrom begonnen, den Strebförderer am Hauptantrieb zu verlassen (Fall 2).

$$t_{\text{crit,SL}} \stackrel{?}{\leq} t_{\text{AFC,crit}} \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow \frac{l_{\text{crit,SL}}}{v_M} \stackrel{?}{\leq} \frac{l_S}{v_{\text{AFC}}}$$

$t_{\text{crit,SL}}$ = Zeit, die der Wazenlader benötigt, um kritische Masse zu schneiden [min]

$t_{\text{AFC,crit}}$ = Zeit, die das zuerst geschnittene Material bis zum Hauptantrieb benötigt [min]

$l_{\text{crit,SL}}$ = kritische Fahrlänge des Walzenladers bei Talfahrt [m]

v_M = Marschgeschwindigkeit der Maschine [m/min]

l_S = Länge des Verfahrensschritts [m]

v_{AFC} = Strebförderergeschwindigkeit [m/min]

Im zweiten Fall kann keine Begrenzung entstehen, weil sich die Gesamtmasse auf dem Strebförderer ab diesem Zeitpunkt verringert. Im ersten Fall würde die kritische Masse den Förderer zum Stillstand bringen. Insgesamt muss deshalb das Gewinnungsgerät diese Distanz langsamer fahren. Die angepasste Geschwindigkeit des Walzenladers ergibt sich aus dieser Fahrdistanz und der Zeit, die das Material vom Beginn des Schnitts bis zum Hauptantrieb benötigt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit für diesen Verfahrensschritt errechnet sich aus der angepassten Geschwindigkeit für

diese kritische Distanz und der schnelleren Geschwindigkeit für den Rest des Verfahrensschritts (Gleichung 12).

$$v'_M = \frac{l_{crit,SL} \cdot \left(\frac{l_{crit,SL}}{l_S / v_{AFC}} \right) + (l_S - l_{crit,SL}) \cdot v_M}{l_S} \quad (12)$$

v'_M = durchschn. Marschgeschw. der Maschine für diesen Schritt $\left[\frac{m}{min} \right]$

$l_{crit,SL}$ = kritische Fahrlänge des Walzenladers bei Talfahrt [m]

v_{AFC} = Strebförderergeschwindigkeit $\left[\frac{m}{min} \right]$

l_S = Länge des Verfahrensschritts [m]

v_M = Marschgeschwindigkeit der Maschine $\left[\frac{m}{min} \right]$

3.1.8 Kapazitätsberechnung auf Stundenbasis

Nachdem für jeden Verfahrensschritt sowohl die gelöste Masse, als auch die dafür benötigte Zeit durch den Quotienten aus zu fahrender Distanz und Marschgeschwindigkeit berechnet wurde, müssen zum Schluss alle Massen und alle Zeiten aufsummiert werden. Die Gesamtkapazität einer Schneidsequenz (Berg- und Talfahrt) ist der Quotient aus der geschnittenen Masse und der dafür benötigten Zeit (Gleichung 13). Der resultierende Wert bildet die berechnete, durchschnittliche Kapazität in Tonnen pro Stunde des Systems bei 100 % Verfügbarkeit der Maschinenteknik.

$$\dot{C}_{Bi-di} = \frac{\sum_1^n m_{G'}}{\sum_1^n \frac{l_S}{v_M} \cdot 60} \quad (13)$$

$\dot{C}_{Bi-di}$ = Gesamtkapazität einer Bi - di Schneidsequenz $\left[\frac{t}{h} \right]$

$m_{G'}$ = gewonnene Masse eines Verfahrensschritts [t]

l_S = Länge des Verfahrensschritts [m]

v_M = Marschgeschwindigkeit der Maschine $\left[\frac{m}{min} \right]$

1 – n = Nummern der Verfahrensschritte

3.1.9 Kapazitätsberechnung auf Jahresbasis

Planmäßige und unplanmäßige Stillstände müssen bei einer Hochrechnung der stundenbezogenen Kapazitätswerte auf Monats- und Jahreswerte Berücksichtigung finden.

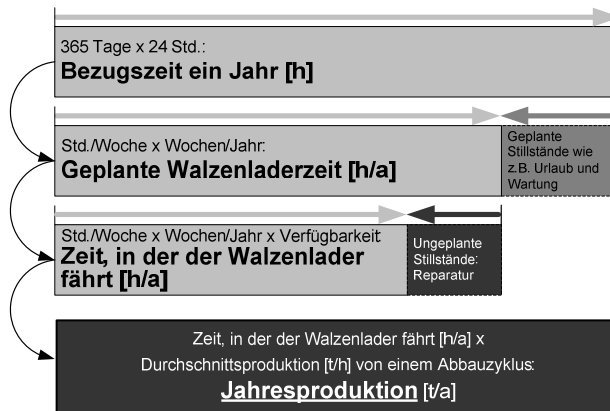


Abbildung 3-4: Einzubeziehende Faktoren bei der Berechnung der Jahresproduktion

Die Bezugszeit der Berechnung der Jahrsproduktion ist ein Jahr mit 365 Tagen und 24 Stunden pro Tag (Abbildung 3-4). Zuerst wird durch die Eingabe der geplanten Wochenarbeitszeit und der Arbeitswochen pro Jahr die geplante Zeit festgelegt, in der der Walzenlader laufen soll. In dieser Größe sind geplante Stillstandszeiten wie Urlaub und Wartung nicht mehr enthalten. Anschließend verringert ein Verfügbarkeitsfaktor diesen Wert zu der Zeit, in der der Walzenlader voraussichtlich laufen wird. Die durchschnittliche stundenbezogene Kapazität des Strebs wird letztendlich mit der wahrscheinlichen Zeit multipliziert, woraus sich die prognostizierte Jahresproduktion ergibt.

3.1.10 Anwendungen des Algorithmus

Aufgrund der fünf detailliert abgebildeten Schnittverfahren, die den Kern des Algorithmus darstellen, ist ein schneller Vergleich ihrer Produktionsleistungen möglich. Eine der ersten Aufgaben der Strebbausimulation war die Überprüfung eines Strebbetriebes nach verfahrenstechnischen Verbesserungspotenzialen. Unter Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen erwies sich das verwendete Bi-di Schnittverfahren als die beste Methode. Die anderen Verfahren konnten durch die manuelle Marschgeschwindigkeitsbegrenzung nicht ihr volles Potenzial ausschöpfen.

Die Simulation ist auch entworfen worden, Planungsszenarien zu berechnen und die Ergebnisse zu interpretieren. Sie eignet sich z. B. sehr gut zur Betrachtung einer sich

verändernden Geologie. Die Aufgabe war ein Strebbetrieb zu überprüfen, bei dem die Flözmächtigkeit in Zukunft abnehmen wird. Nach Berechnung des voraussichtlichen Förderverlusts wurden Lösungsvorschläge erarbeitet, die die Förderkapazität trotz schlechterer Geologie auf gleichem Niveau hält.

Zusätzlich ist der Algorithmus in der Lage, die Menge von mitgeschnittenem Nebengestein zu bestimmen. Im Anhang A8 ist beschrieben, wie die Strebbausimulation in modifizierter Form in der selektiven Gewinnung von Kalisalz eingesetzt wurde.

3.2 Darstellung von Massenströmen

Bunker sind Ausgleichsbehälter zwischen der Gewinnung und der Aufbereitung, wobei sie sowohl über- als auch untertage stehen können. Ihre Aufgabe besteht darin, den variierenden Massenstrom zu vergleichmäßigen, indem sie Förderspitzen und Lücken des Materialstroms puffern, so dass ein kontinuierlicher Strom mit konstanter Kapazität zur Aufbereitungsanlage gelangt. Mit steigender Leistungsfähigkeit eines Gewinnungsbetriebs wirken Bunkergrößen, die ursprünglich für kleinere Gewinnungskapazitäten ausgelegt wurden, einschränkend, weil sie länger andauernde Förderperioden nicht mehr auffangen. In dem Zusammenhang ist die Aufgabe der Massenstromberechnung und Bunkersimulation, den Bunkerfüllstand über einen definierten Zeitraum abzubilden, auftretende Einschränkungen wie ein Über- oder Leerlaufen bereits in der Planungsphase des Betriebs aufzudecken, und zu quantifizieren, so dass Lösungsansätze aus der Simulation abgeleitet werden können.

Der Bunker wird mit diskontinuierlichem Zulauf aus einem Streb und einem weiteren aus dem Vortrieb, der hier als kontinuierlich angenommen wird, simuliert. Der Bunkerabzug in Richtung Aufbereitung erfolgt kontinuierlich (Abbildung 3-5).

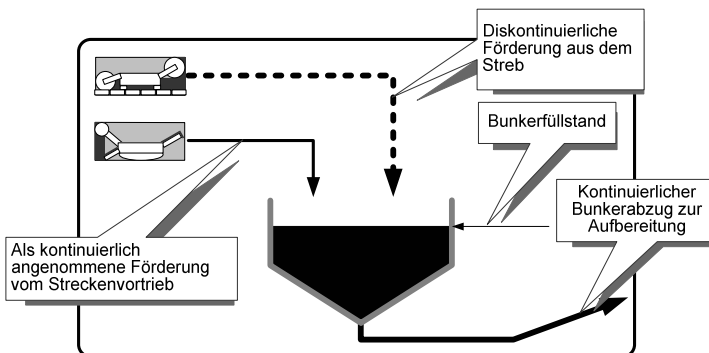


Abbildung 3-5: Anordnung der Betriebsmittel im Bunker-Modul

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise der Massenstromberechnung und Bunkersimulation

Der Berechnungsalgorithmus berücksichtigte bisher nur Walzenladeraktionen, aus denen Gewinnungskapazitäten ermittelt wurden. Ausgehend vom bestehenden Walzenlader-Modell simuliert dieser Zusatz zum Algorithmus den diskontinuierlichen Massenstrom auf dem Förderer. Zudem berücksichtigt er einen als kontinuierlich angenommenen Zulauf aus dem Streckenvortrieb, der aufgrund seines geringen Einflusses im Hinblick auf den Bunkerfüllstand kaum ins Gewicht fällt, da wesentlich größere Mengen aus dem Streb zulaufen.

Alle Walzenlader-Schnittverfahren haben einen ungleichmäßigen Massenstrom innerhalb der Berg- und der Talfahrt [KUNDEL et al._1983, S.108ff]. Die vier Gründe für diese Diskontinuität und Varianz in der Intensität werden im Folgenden näher erläutert:

- Geschwindigkeitsverringern während der Strebrandoperationen
- Planmäßige Stillstände des Walzenladers zwecks Fahrtrichtungswechsel
- Zwei Fahrtrichtungen des Walzenladers bei konstanter Abförderrichtung
- Pufferwirkung des Förderers

In jedem Schnittverfahren muss der Walzenlader im Strebrandbereich seine Geschwindigkeit verringern, spätestens bei Erreichen des Streb-Strecken-Übergangs ist ein Bremsvorgang einzuleiten. Im Bi-di sind beispielsweise alle Verfahrensschritte mit Ausnahme der zwei Gewinnungsfahrten Nr. 3 und Nr. 14 (Abbildung 3-1) von reduzierter Geschwindigkeit, Beschleunigungsphasen und Bremsvorgängen geprägt. Die reduzierten Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsänderungen an den Strebrändern äußern sich in geringeren und variierenden Massenströmen auf dem Förderer. Am Ende des Strebs angekommen, stoppt der Walzenlader seine Fahrt, um die Tragarme und ggf. Räumschilde zu schwenken und den Fahrtrichtungswechsel einzuleiten. In dieser Zeit gelangt kein bis wenig geschnittenes Material auf den Förderer, so dass Lücken im Förderstrom entstehen. Während der beiden Gewinnungsfahrten fährt der Walzenlader mit konstant hoher Geschwindigkeit, die zu einer hohen Fördererbeladung führt [KACI et al._1997].

Wie bereits in Kapitel 3.1.5 angesprochen, stellt sich bei angenommener konstanter Marschgeschwindigkeit des Walzenladers und somit konstanter Gewinnungskapazität ein unterschiedlicher Massenstrom auf dem Förderer in Abhängigkeit der Fahrtrichtung ein (Gleichung 14).

$$\dot{m}_{AFC} = \dot{m}_M \cdot \frac{v_{AFC}}{v_{AFC} \pm v_M} \quad (14)$$

+ = Bergfahrt

- = Talfahrt

$$\dot{m}_{AFC} = \text{Fördererkapazität} \left[\frac{t}{h} \right]$$

$$\dot{m}_M = \text{Gewinnungskapazität des Walzenladers} \left[\frac{t}{h} \right]$$

$$v_{AFC} = \text{Förderergeschwindigkeit} \left[\frac{m}{\min} \right]$$

$$v_M = \text{Marschgeschwindigkeit der Maschine} \left[\frac{m}{\min} \right]$$

Nachdem die auf dem Förderer resultierende Kapazität errechnet wurde, ausgehend von der Gewinnungskapazität des Walzenladers, muss anschließend ihre Dauer bzw. die Länge auf dem Förderer ermittelt werden. Für die Abbildung dieses Massenstroms aus dem Streb ist zuerst die Definition eines Punkts nötig, von dem aus der Massenstrom betrachtet wird. Die Maschine ist als Referenzpunkt ungeeignet, weil sie nicht stationär ist. Der Übergang vom Streb- zum Streckenförderer am Hauptantrieb bietet sich an, weil sämtliches Material aus dem Streb diesen stationären Punkt passiert.

Mit dem Start einer Sequenz eines Schnittverfahrens steht der Walzenlader am Hauptantrieb. Es besteht eine zu vernachlässigende Verzögerung zwischen der Maschinenaktion und dem Resultat am Hauptantrieb. Auf Bergfahrt entfernt sich der Walzenlader zunehmend vom Hauptantrieb, so dass die zeitliche Differenz zwischen Maschinenaktion und Ergebnis am Hauptantrieb größer wird. Zunehmend dauert es, bis die Kohle am Hauptantrieb ankommt. Der Förderer ist deshalb auf Bergfahrt als ein größer werdender Puffer anzusehen.

Auf Talfahrt nähert sich der Walzenlader dem Hauptantrieb. Die zeitliche Differenz zwischen Walzenladeraktion und Resultat am Hauptantrieb verringert sich stetig, so dass der Förderer wie ein kleiner werdender Puffer reagiert.

Die Zeitabschnitte auf dem Förderer werden im Folgenden Beladungsabschnitte genannt. Sie errechnen sich aus der Zeit, die der Walzenlader für einen Verfahrensschritt benötigt, und der Geschwindigkeit des Förderers. Aus der Dauer jedes Beladungsabschnitts lässt sich anschließend eine Kurve der Kapazitätsschwankungen über die Zeit darstellen.

Die folgende Berechnung eines Beladungsabschnitts bezieht sich auf einen beispielhaften Verfahrensschritt innerhalb der mehrteiligen Schneidsequenz. Ausgang der Berechnung ist die Dauer der Walzenladeraktion (Gleichung 15). Die sich daraus

ergebende Fördererbeladungslänge hängt von der Fahrtrichtung und den Geschwindigkeiten der Betriebsmittel ab (Gleichung 16). Um die Dauer des Beladungsabschnitts zu berechnen, muss die Geschwindigkeit des Förderers berücksichtigt werden (Gleichung 17). Zusammengefasst ergibt sich daraus die Gleichung 18, die nicht zutreffend für Stillstände der Maschine ist. In dem Fall muss lediglich die Stillstandszeit mit der Förderergeschwindigkeit multipliziert werden, aus der sich dann die Beladungslücke auf dem Förderer ergibt.

$$t_{SL} = \frac{l_S}{v_M} \quad (15)$$

$$l_{AFC} = t_{SL} \cdot (v_{AFC} \pm v_M) \quad (16)$$

$$t_{AFC} = \frac{l_{AFC}}{v_{AFC}} \quad (17)$$

⇒

$$t_{AFC} = l_S \cdot \left[\frac{1}{v_M} \pm \frac{1}{v_{AFC}} \right] \quad (18)$$

+ = Bergfahrt

- = Talfahrt

t_{SL} = Dauer der Walzenladeraktion [min]

l_S = Länge des Verfahrensschritts [m]

v_M = Marschgeschwindigkeit der Maschine $\left[\frac{m}{min}\right]$

l_{AFC} = Beladungslänge auf dem Förderer [m]

v_{AFC} = Förderergeschwindigkeit $\left[\frac{m}{min}\right]$

t_{AFC} = Dauer der Fördererbeladung [min]

Die einzelnen Kapazitäten der Verfahrensschritte einer Schneidsequenz ergeben zusammen mit den errechneten Zeiten aneinandergereiht die resultierende Kurve in Abbildung 3-6.

In der Kurve werden die Lücken aufgrund von Richtungswechseln deutlich, die geringere und längere Förderkapazität auf Bergfahrt, die größere und kürzere Förderkapazität auf Talfahrt sowie den zeitlichen Unterschied zwischen Walzenladeraktion (hellgrau) und Ergebnis am Hauptantrieb (schwarz). Der Zeitunterschied ist am größten, wenn sich der Walzenlader am Hilfsantrieb befindet, weil das Material den ganzen Streb entlang gefördert werden muss, bis es am Hauptantrieb ankommt.

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

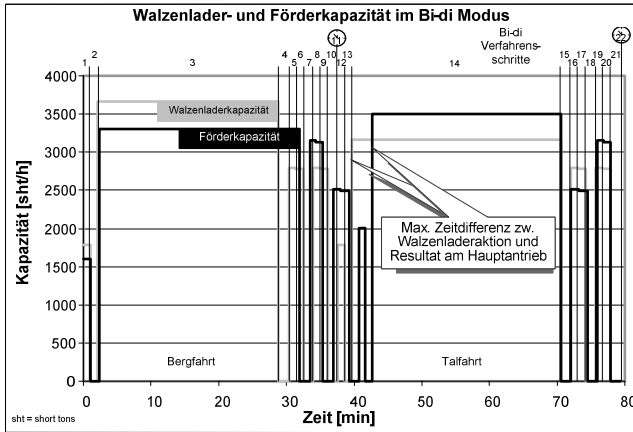


Abbildung 3-6: Walzenlader- und Förderkapazitäten über die Zeit einer Bi-di Sequenz

Für die in den Bunker eingehenden Massen muss zusätzlich noch eine zeitliche Verzögerung berücksichtigt werden, die zwischen Hauptantrieb und Bunkereingang auftritt. Sie äußert sich in einer Verschiebung der Füllstandskurve nach rechts auf der Zeitachse in Abhängigkeit von der Distanz zum Bunker und von der Geschwindigkeit der dazwischen liegenden Fördermittel.

Aus der Berechnung der Fördererkapazitäten lässt sich nun ein Bunkerfüllstand für jeden Zeitabschnitt und somit für eine gesamte Schneidsequenz errechnen, in der drei Größen berücksichtigt werden:

- Masse, die bereits zu Beginn des Zeitabschnitts im Bunker gewesen ist
- Masse, die während des Zeitabschnitts in den Bunker gefördert wird
- Masse, die innerhalb des Zeitabschnitts aus dem Bunker abgezogen wird

Die Masse, die in diesem Zeitabschnitt in den Bunker gelangt, errechnet sich aus der ermittelten Förderkapazität aus dem Abbau und dem Streckenvortrieb und ihrer Dauer (Gleichung 19).

$$m_{AFC} = (\dot{m}_{AFC} + \dot{m}_{CM}) \cdot t_{AFC} \quad (19)$$

m_{AFC} = Masse, die in den Bunker gelangt [t]

$\dot{m}_{AFC}$ = Förderkapazität dieses Zeitabschnitts $\left[\frac{t}{h} \right]$

$\dot{m}_{CM}$ = Kapazität des Streckenvortriebs $\left[\frac{t}{h} \right]$

t_{AFC} = Dauer des betrachteten Zeitabschnitts [h]

Die abgezogene Masse aus dem Bunker ergibt sich aus der konstanten Kapazität des Abzugsbands und der Dauer des Zeitabschnitts (Gleichung 20).

$$m_{SB} = \dot{m}_{SB} \cdot t_{AFC} \quad (20)$$

$$m_{SB} = \text{Abzugsmenge [t]}$$

$$\dot{m}_{SB} = \text{Kapazität des Abzugsbands} \left[\frac{\text{t}}{\text{h}} \right]$$

$$t_{AFC} = \text{betrachteter Zeitabschnitt [h]}$$

Der neue Bunkerfüllstand $m_{\text{level neu}}$ resultiert für diesen Zeitabschnitt folglich aus dem alten Füllstand plus der Masse, die in dem Zeitraum in den Bunker gelangt, abzüglich der Masse, die aus dem Bunker abgefördert wird (Abbildung 3-7). Durch Aneinanderreihung aller Füllstände über die Zeit wird die Füllstandsentwicklung während einer Schneidsequenz graphisch abgebildet.

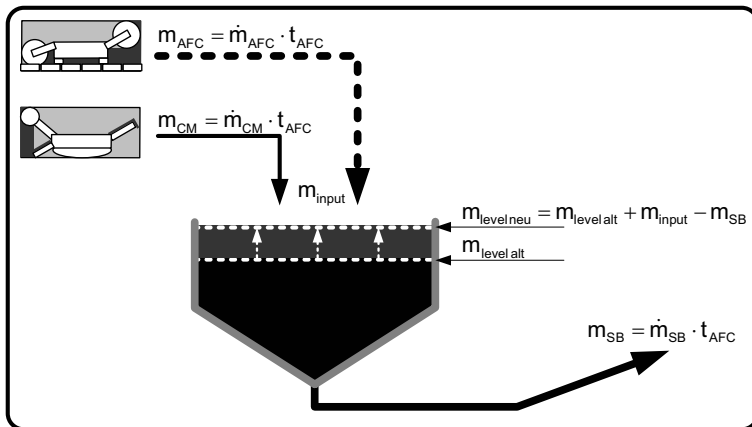


Abbildung 3-7: Berechnung des Bunkerfüllstands für einen Zeitabschnitt

Allgemein lassen sich folgende Fragestellungen mit der erstellten Simulation bearbeiten, bei dem von einem System ohne Stillstände ausgegangen wird:

- Wie hoch darf die Walzenladergeschwindigkeit und wie lang darf der Streb sein bzw. die Gewinnungsfahrt bei großer Kapazität dauern, damit der Bunker nicht an seine Grenzen stößt?
- Wann muss der Walzenlader anhalten, weil der Bunker an seine Kapazität stößt?

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

- Wie lange muss der Walzenlader anhalten, damit genug Material den Bunker verlassen hat, so dass er die Gewinnungsfahrt ohne weiteren Halt bis zum Strebende fortführen kann?

Ein Beispielszenario zur Veranschaulichung der Bunkersimulation ist im Anhang A5 aufgeführt.

3.3 Simulation eines zweiten, gleichzeitig laufenden Abbaubetriebs

Die Intention dieses Teils der Simulation ist die Abbildung zweier Förderströme auf einem gemeinsamen Band (Abbildung 3-8), mit dem Ziel, den zweiten Förderstrom so zu beeinflussen, dass das gemeinsame Band optimal ausgenutzt und eine Steigerung der Gesamtleistung des Bergwerks bei gleichzeitiger Risikominimierung gegen Totalausfall eintritt.

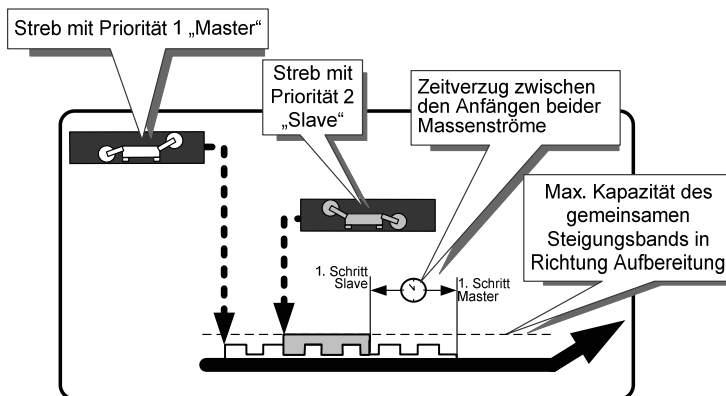


Abbildung 3-8: Anordnung von Master und Slave mit Zeitversatz in den Massenströmen

Wenn ein Bergwerk nur einen Strebbetrieb besitzt, besteht das Risiko, dass bei Ausfall der Förderung Lieferengpässe auftreten. Durch ungeplante Stillstände wie z. B. Hangendnachfall ist das Bergwerk nicht in der Lage, die Lieferzusagen einzuhalten, sofern es nicht für diesen Engpass vorgesorgt hat. Eine derartige Vorsorge gegen ein Ausfallrisiko ist mit Kosten verbunden. Die Anschaffung eines zweiten Strebs erlaubt es, das Risiko zu senken, weil der zweite Streb die Engpässe des ersten Abbaubetriebs ausgleichen kann. Die Kosten der Anschaffung und laufende Kosten für den zweiten Streb sind in diesem Fall z. B. Vertragsstrafen, Kosten für Zukauf von Kohle oder Kosten für Sonderschichten gegenüberzustellen. Zusätzlich ist es aus genehmigungsrechtlicher

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

Sicht einfacher, einen weiteren Abbaubetrieb in einem bestehenden Bergwerk unterzubringen, als ein neues Bergwerk zu erschließen.

Wenn jedoch mehrere Strebe die bestehende Infrastruktur zur Abförderung nutzen, die ursprünglich für nur einen Streb ausgelegt war, dann ist eine gegenseitige Abstimmung der Gewinnungs- und Förderkapazitäten erforderlich. Das Master-Slave-Longwall Module (MSLM) wurde für die Simulation und Koordinierung zweier Strebbetriebe entwickelt.

Dabei erhält einer der beiden Strebe die Priorität eins, der im Folgenden mit „Master“ bezeichnet wird. Der Streb mit der Priorität zwei erhält die Bezeichnung „Slave“. Der Master ist nicht durch den Slave beeinflussbar. Das bedeutet, dass der Master nur durch seine eigenen möglichen Engpässe eingeschränkt wird. Der Slave erhält die Aufgabe, parallel zum Master und in Abhängigkeit von dessen Gewinnungskapazität zu arbeiten, so dass er nur so viel schneidet, wie noch auf dem gemeinsam genutzten Band an Transportkapazität zur Verfügung steht. Gibt es einen planmäßigen oder unplanmäßigen Stillstand des Masters, steigert ab diesem Zeitpunkt der Slave seine Gewinnungsleistung und kompensiert soweit wie möglich den Förderausfall.

Bei laufendem Master ist die Aufgabe des Slaves, auf die Aktionen des Masters zu reagieren. Das bedeutet, dass der Master per Definition immer weiter als der Slave vom Punkt des Zusammenführens der Massenströme entfernt sein muss, weil die Slave-Aktionen dadurch immer zeitlich nach denen des Masters erfolgen. Der Aufbau und der Datenfluss innerhalb des MSLM ist im Anhang A6 beschrieben.

Der Algorithmus simuliert drei Master-Sequenzen und schließt mit der Berechnung der auf der Bandstraße liegenden Gesamtmasse aus beiden Strebbetrieben ab. Diese Gesamtmasse in Bezug zur Gesamtdauer der drei Sequenzen liefert die durchschnittliche gemeinsame Gewinnungskapazität pro Stunde.

Der Berechnungsalgorithmus beinhaltet folgende drei¹⁹ Kombinationen der gängigsten Schnittverfahren:

- Bi-di Master mit Bi-di Slave
- Bi-di Master mit PaWeb Slave
- PaWeb Master mit PaWeb Slave

¹⁹ Die Simulation PaWeb Master mit Bi-di Slave wurde nicht berücksichtigt, weil sie als Bi-di Master mit PaWeb Slave unter vertauschten Parametersätzen durchgeführt werden kann.

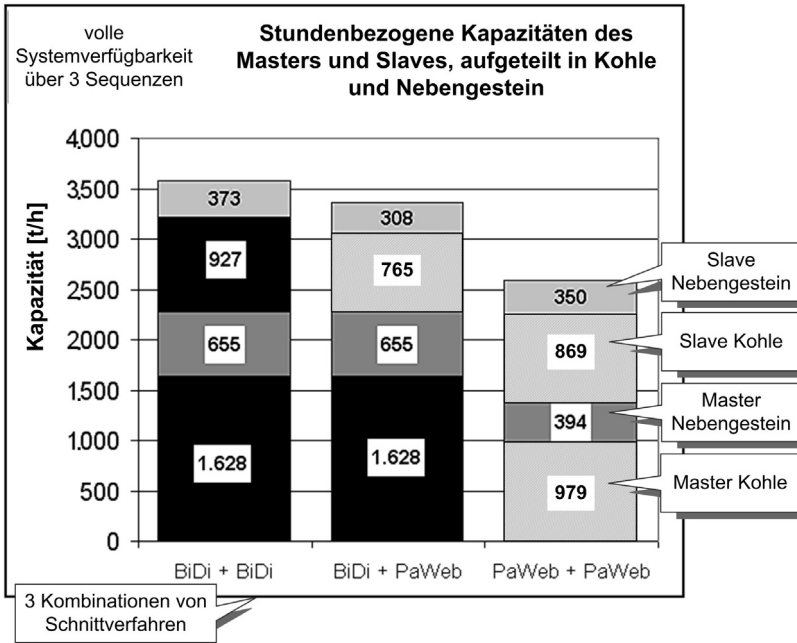


Abbildung 3-9: Stundenbezogene Kapazitäten der drei Schnittverfahren-Kombinationen

Abbildung 3-9 ermöglicht einen Vergleich der Leistungen der drei abgebildeten Kombinationen von Schnittverfahren auf der Basis von drei Master Sequenzen. Der linke Balken ist die Kombination von Bi-di mit Bi-di, bei dem in der Mitte ist der Slave im PaWeb Modus und der rechte Balken zeigt beide Strebe im PaWeb Modus. Die angegebenen Kapazitäten sind jeweils (von unten nach oben) die der Master-Kohle, des Master-Nebengesteins, der Slave-Kohle und des Slave-Nebengesteins.

Während die stundenbezogene Kapazitätsprognose eine volle Systemverfügbarkeit über drei Master-Sequenzen voraussetzt, ist für die Prognose der Jahresförderung die Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeiten beider Strebe erforderlich. Abbildung 3-10 veranschaulicht die möglichen neun Kombinationen der Betriebszustände beider Strebbetriebe, ob beide laufen, nur einer aktiv ist oder beide nicht in Betrieb sind.

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

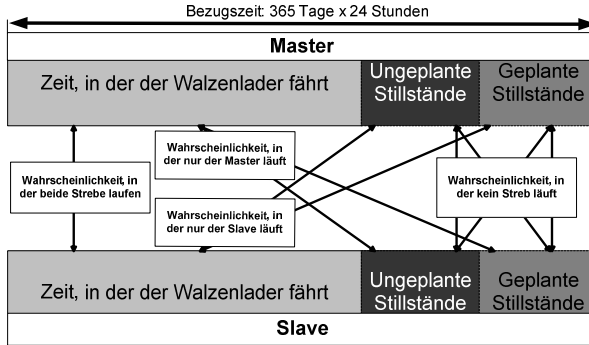


Abbildung 3-10: Verfügbarkeiten beider Strebbetriebe

Die Wahrscheinlichkeiten des Eintreffens der vier Zustände in neun Kombinationen geben die folgenden vier Formeln wieder (Gleichungen 21-24). Sie setzen sich aus dem Produkt der Dauer beider beteiligten Zeitabschnitte geteilt durch das Quadrat der Bezugszeit (Jahresstunden) zusammen [VOGELWEDDE_2008]:

- Wahrscheinlichkeit, dass beide Strebe laufen:

$$b_p = \frac{h_M \cdot \eta_M \cdot h_S \cdot \eta_S}{(365 \cdot 24h)^2} \quad (21)$$

- Wahrscheinlichkeit, dass nur der Master läuft:

$$m_p = \frac{h_M \cdot \eta_M \cdot h_S \cdot (1 - \eta_S)}{(365 \cdot 24h)^2} + \frac{h_M \cdot \eta_M \cdot (365 \cdot 24 - h_S)}{(365 \cdot 24h)^2} \quad (22)$$

- Wahrscheinlichkeit, dass nur der Slave läuft:

$$s_p = \frac{h_S \cdot \eta_S \cdot h_M \cdot (1 - \eta_M)}{(365 \cdot 24h)^2} + \frac{h_S \cdot \eta_S \cdot 365 \cdot 24 - h_M}{(365 \cdot 24h)^2} \quad (23)$$

- Wahrscheinlichkeit, dass keiner von beiden läuft:

$$n_p = \frac{h_M \cdot (1 - \eta_M) \cdot h_S \cdot (1 - \eta_S)}{(365 \cdot 24h)^2} + \frac{h_M \cdot (1 - \eta_M) \cdot (365 \cdot 24 - h_S)}{(365 \cdot 24h)^2} + \frac{h_S \cdot (1 - \eta_S) \cdot (365 \cdot 24 - h_M)}{(365 \cdot 24h)^2} + \frac{(365 \cdot 24 - h_M) \cdot (365 \cdot 24 - h_S)}{(365 \cdot 24h)^2} \quad (24)$$

Index M = Master

Index S = Slave

b_P = Wahrscheinlichkeit, dass beide Strebbetriebe laufen

m_P = Wahrscheinlichkeit, dass nur der Master läuft

s_P = Wahrscheinlichkeit, dass nur der Slave läuft

n_P = Wahrscheinlichkeit, dass keiner läuft

$h_M = \frac{\text{Stunden}_M}{\text{Woche}} \cdot \frac{\text{Wochen}_M}{\text{Jahr}} = \text{Stunden geplanter Master - Operation pro Jahr}$

η_M = Verfügbarkeit des Masterstrebs

$h_S = \frac{\text{Stunden}_S}{\text{Woche}} \cdot \frac{\text{Wochen}_S}{\text{Jahr}} = \text{Stunden geplanter Slave - Operation pro Jahr}$

η_S = Verfügbarkeit des Slavestrebs

Den aus den Verfügbarkeitszahlen errechneten Wahrscheinlichkeiten werden die jeweiligen stündlichen Gewinnungskapazitäten zugewiesen. Daraus ergibt sich eine jahresdurchschnittliche Kapazität in Tonnen pro Stunde, die mit den Gesamtstunden pro Jahr (365 Tage x 24 Stunden) hochgerechnet die prognostizierte Jahresförderung ergibt. Diese Berechnung berücksichtigt keinen möglichen Verfahrenswechsel innerhalb des Jahres.

Mit zunehmendem Verständnis für das System zweier zusammenwirkender Strebe zeichnet sich die Tendenz ab, dass bei niedrigen Marschgeschwindigkeiten die Kombination eines Bi-di Masters mit einem PaWeb-Slave am günstigsten ist. Der gleichmäßige und geringere Massenstrom des PaWeb fügt sich gut mit den hohen Massenströmen des Bi-di zusammen. Fällt der Master für längere Zeit aus, sollte der Slave schnellstmöglich auf Bi-di wechseln, um in dieser Zeit (bei niedrigen Marschgeschwindigkeiten) hohe Kapazitäten zu erreichen. Eine Flexibilität in der Auswahl der Schnittverfahren garantiert somit hohe Förderzahlen. Diese Aussage hat bereits RUTHERFORD in einem Artikel über den Einfluss von Schnittverfahren im Jahr 2005 gemacht [BAHR et al._2005].

Mit dem MSLM ist der Benutzer in der Lage, u. a. folgende Fragen für die individuelle Situation in einem Bergwerk mit zwei Streben zu beantworten:

- Welches ist die beste Kombination von Schnittverfahren?
- Wie schnell darf der Slave-Walzenlader fahren, damit nicht beide Massenströme die Kapazität des gemeinsamen Bands übersteigen?

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

- Wie sehen die Geschwindigkeitsprofile beider Walzenlader unter optimaler Ausnutzung des Förderbands aus? Sind sie realistisch?
- Wie viele Stunden pro Woche müssen der Master- und der Slave laufen, damit eine geforderte Jahresförderung erreicht wird?
- Lohnt es sich, den Master-Walzenlader in seiner Geschwindigkeit zugunsten des Slave-Walzenladers zu begrenzen? Ist dadurch eine Steigerung der gesamten Förderung möglich? Gibt es ein optimales Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Master und Slave?

Ein Beispielszenario zweier gleichzeitig laufender Strebbetriebe liegt im Anhang A7 vor.

3.4 Umsetzung des Algorithmus in Excel

Das Ziel einhergehend mit der Erstellung des Berechnungsalgorithmus ist zum einen die Konditionierung des Programms für den Umgang durch einen erweiterten Personenkreis, und zum anderen die Eingabemöglichkeit der Parameter in metrischen als auch in US Einheiten. Ersteres bedeutet, dass 70 in Tabellenform vorliegende metrische Eingabefelder strukturiert werden müssen. Weil trotzdem diese Menge an Eingabewerten unübersichtlich bleibt, sind Eingabemasken entwickelt worden (Anhang A3), die durch ihre graphische Aufarbeitung der Inhalte ein intuitives Arbeiten mit dem Programm ermöglichen. Die Bilder in den Eingabemasken stellen schematisch die verwendeten Betriebsmittel und deren Zusammenhänge dar.

Zusätzlich zu den 70 metrischen Eingabefeldern wurden weitere in US Einheiten erstellt. Eine Visual Basic for Applications (VBA)-Programmierung, die die Formatierung derjenigen Felder ausliest, in denen eine Eingabe stattfindet, rechnet den Wert in das andere Einheitssystem um und schreibt den neuen Wert in das entsprechende benachbarte Eingabefeld [KEUTEN et al._2008]. Dadurch stehen in der Tabelle dem Benutzer beide Maßsysteme gleichzeitig zur Verfügung. In den Eingabemasken kann der Benutzer zwischen den Systemen umschalten.

Abbildung 3-11 stellt die Struktur des Berechnungsalgorithmus und den Datenfluss im Umgang mit dem Algorithmus schematisch dar. Der Benutzer kann entscheiden, ob er mit den Eingabemasken oder mit der Tabelle arbeiten möchte. Weil die Masken permanent über einen VBA-Code mit der Tabelle kommunizieren und die Eingabewerte sowie berechnete Werte austauschen, ist es dem Benutzer möglich, zwischen der Tabelle und den Eingabemasken zu wechseln und er hat jederzeit das von ihm eingegebene Szenario vorliegen. Gibt er in einer der beiden Umgebungen einen fehlerhaften

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

Eingabewert ein oder ergibt sich aus der Eingabe ein ungültiges Berechnungsergebnis, dann entdeckt das die Plausibilitätsprüfung und macht es dem Benutzer kenntlich. Der Aufbau und die Funktionsweise der Plausibilitätsprüfung ist dem Anhang A4 zu entnehmen.

Aufbau und Ablauf der Simulation

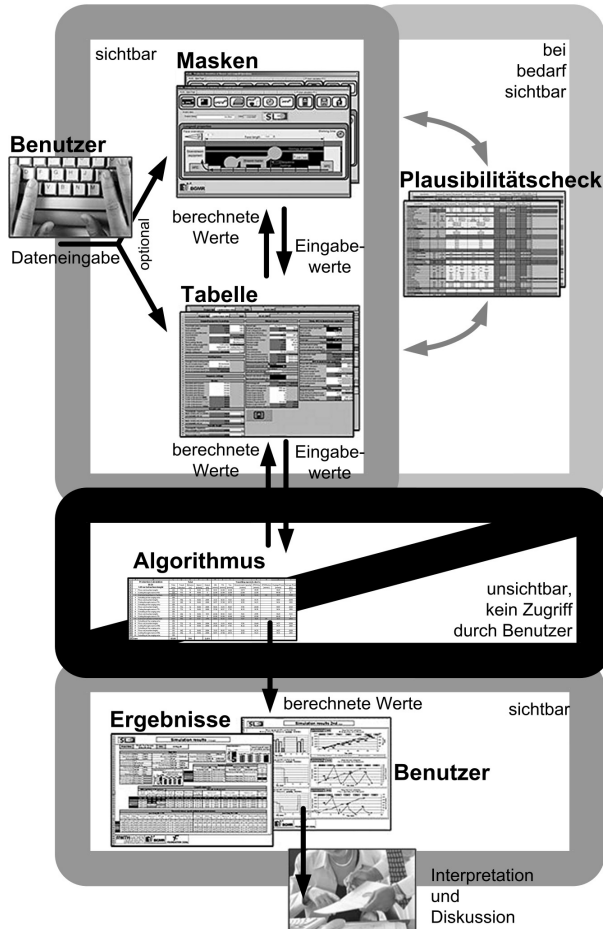


Abbildung 3-11: Struktur und Datenfluss des Berechnungsalgorithmus

Die Eingabetabelle ist verbunden mit den nicht sichtbaren Tabellenblättern, auf denen die Berechnungen stattfinden. Zwischen beiden findet im Hintergrund ein ständiger Datenaustausch statt, so dass immer die aktuellen Berechnungsergebnisse dem Be-

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

nutzer vorliegen. Ein Zugriff auf die Berechnungstabellenblätter ist dem Benutzer nicht möglich, im Gegensatz zu den Ergebnistabellenblättern, auf die der Benutzer jederzeit zureifen kann.

Zur Unterbindung einer unkontrollierten Verbreitung der Software durch die Anwender verhindert eine in VBA programmierte Überprüfung der Hardware den Start des Simulationsalgorithmus, wenn die Hardware nicht freigegeben wurde. In der Prüfung werden Media Access Control (MAC)-Adressen der Netzwerkkarten und Seriennummern der Festplatten bzw. Universal Serial Bus (USB)-Datenträgern, auf denen der Algorithmus startet, kontrolliert.

3 Struktur und Realisierung der Strebbau-Simulation

„Auch Zufälle sind nur Berechnung.“

Erhard Horst Bellermann (1937), deutscher Bauingenieur, Dichter und Aphoristiker

4 Berechnung eines Beispiel-Strebs

Im folgenden Rechenbeispiel wird die Streblänge eines Abbaubetriebs von 150 auf 500 m in 50-m-Schritten vergrößert, um zu zeigen, welchen Einfluss dieser Parameter bei unterschiedlichen Schnittverfahren und unterschiedlichen Maschinentypen auf die Gewinnungskapazität hat und welche allgemeingültigen Schlüsse²⁰ daraus gezogen werden können. Im Vergleich stehen die in Kapitel 2.3 beschriebenen fünf Schnittverfahren sowie zwei Walzenlader des Typs SL 300 und SL 750 der Fa. Eickhoff Bergbautechnik.

Tabelle 1: Parametersätze der verwendeten Walzenladertypen

Typ Walzenlader	SL 750	SL 300
Schneidmotorleistung	2x900 kW	2x600 kW
Windenleistung	2x120 kW	2x80 kW
Walzendurchmesser	1,8 m	1,8 m
Tunnelquerschnitt	0,525 m ²	0,475 m ²
Maschinengewicht	68 t	45 t
Maschinenlänge	16 m	14 m
Marschgeschwindigkeit begrenzt auf	30 m/min Gewinnungsfahrt 10 m/min Strebrandbereich	30 m/min Gewinnungsfahrt 10 m/min Strebrandbereich
Maximaler Vorschub	836 kN @ 16 m/min	560 kN @ 16 m/min

Der Beispielstreb besitzt eine Mächtigkeit von 3 m mittelharter Kohle (0,3 kWh/m³) bei flacher Lagerung. Als Abfördersystem wird ein Kettenkratzerförderer mit 0,57 m² maximalem Beladungsquerschnitt und 1,88 m/s Kettengeschwindigkeit bei einer insgesamt installierten Antriebsleistung von drei Mal 1.000 kW eingesetzt. Die höchstmögliche Abförderkapazität wird auf 4.000 t/h begrenzt. Die Walzenlader sind mit den in Tabelle 1 aufgeführten Parametern ausgestattet.

²⁰ Die konkreten Ergebnisse dieses Rechenbeispiels besitzen keine Allgemeingültigkeit, sondern beziehen sich genau auf diesen Parametersatz.

4.1 Kapazität in Abhängigkeit der Streblänge

Bei der kleinsten Streblänge von 150 m teilen sich die Schnittverfahren in zwei Gruppen auf (Abbildung 4-1). Diejenigen mit variabler Schnitttiefe liegen ungefähr zwischen 2.050 und 2.150 t/h vor den Vollschnittverfahren, deren Kapazitäten sich zwischen 1.850 t/h und 1.950 t/h bewegen. Das beste Verfahren ist das PaWeb, weil es von den wenigen Richtungswechseln und hohen Marschgeschwindigkeiten profitiert. Das schlechteste Schnittverfahren ist das Uni-di, bei dem sich die Leer- oder Räumfahrten negativ auswirken.

Beim Bi-di kommt das gleiche Berechnungsergebnis von beiden Maschinentypen eher zufällig zustande, denn der SL 300 ist durch die Motorleistung des nachlaufenden Schneidmotors begrenzt, der bei einem Walzendurchmesser von 1,8 m gleichzeitig viel schneiden und laden muss. Bei dem größeren SL 750 ist dieses Problem zwar durch eine höhere Schneidleistung behoben, jedoch begrenzt hier der maximale Querschnitt des Förderers die Marschgeschwindigkeit in fast gleichem Maße.

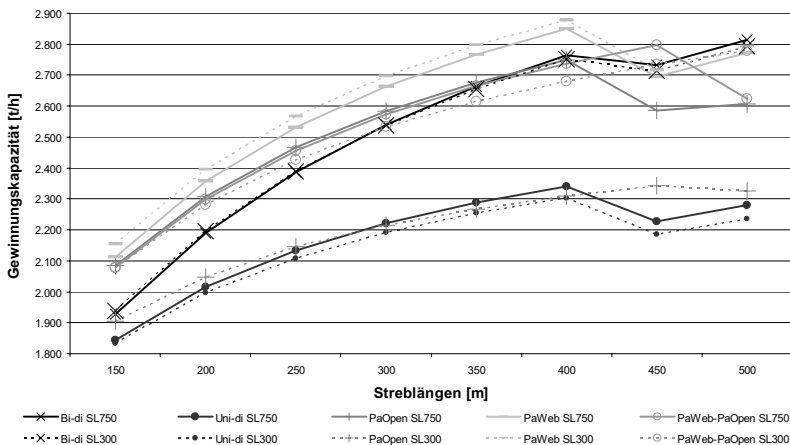


Abbildung 4-1: Gewinnungskapazitäten verschiedener Schnittverfahren und Maschinentypen bei ansteigender Streblänge

Einen Unterschied in der Gewinnungsleistung zwischen den beiden Maschinentypen lässt sich zum einen beim PaWeb erkennen, bei dem die kleinere Maschine wegen ihrer geringeren Abmaße schneller durch die Strebrandbereiche fährt und deshalb insgesamt um ca. 2% produktiver ist. Zum anderen gibt es einen großen Unterschied beim PaOpen, bei dem jeweils der vorlaufende Schneidmotor die begrenzende Größe

4 Berechnung eines Beispiel-Strebs

darstellt. Mit Hilfe des stärkeren Motors erreicht der SL 750 eine höhere Marschgeschwindigkeit und deshalb ca. 10 % mehr Gewinnungsleistung.

Mit ansteigender Streblänge bis auf 400 m erhöhen sich alle Kapazitäten degressiv. Die stärksten Zuwachsraten verzeichnet das Bi-di mit ca. 43 % Zuwachs im 400-m-Streb als beim 150-m-Streb, gefolgt vom PaWeb mit ca. 34 %. Das PaWeb ist auch wie das Bi-di auf Bergfahrt durch den Fördererquerschnitt begrenzt, jedoch erreicht es auf Talfahrt bereits die maximal zulässige Maschinengeschwindigkeit, ohne dass der Fördererquerschnitt ausgelastet ist. Eine Strebverlängerung hat somit nicht den gleichen Effekt wie beim Bi-di, bei dem der Fördererquerschnitt voll ausgelastet ist.

Jenseits der 400 m Streblänge verlieren fast alle Schnittverfahren in Bezug auf ihre Leistung. Bei der Bergfahrt übersteigt die Beladung auf dem Förderer die für die Motoren kritische Masse. Der Walzenlader muss daraufhin seine Marschgeschwindigkeit verringern, so dass sich die Zykluszeit erhöht. Lediglich beide Maschinen im PaWeb-PaOpen-Modus und der SL 300 mit dem PaOpen steigern noch ihre Leistung. Die von ihnen verursachte Beladung ist nicht so hoch wie bei den anderen Verfahren, mit dem Effekt, dass sie erst jenseits der 450 m Streblänge Kapazitätseinbußen zu verzeichnen haben.

Bei 500 m Streblänge steigern die meisten Verfahren wieder ihre Leistung gegenüber dem vorangegangenen Kapazitätseinbruch. Jedoch liegt das Bi-di als bestes Verfahren immer noch um ca. 2 % unterhalb des PaWeb mit der kleineren Maschine im 400-m-Streb.

4.2 Abgeleitete allgemeingültige Aussagen zur Strebplanung

Aus den Berechnungen lassen sich allgemeingültige Aussagen ableiten:

- Die Streblänge hat einen unterschiedlichen Einfluss auf die Gewinnungskapazität in Abhängigkeit vom verwendeten Schnittverfahren. Eine Verlängerung des Strebs bedeutet nicht unbedingt eine Steigerung der Gewinnungskapazität.
- Die Berechnungsergebnisse zeigen deutlich, dass – unabhängig vom Maschinentyp – alleine durch eine andere Verfahrenstechnik, eine Steigerung der Gewinnungskapazität möglich ist, wie z. B. der 10 % Leistungszuwachs vom Bi-di zum PaWeb im 150 m Streb beweist.
- Eine größere Maschine mit mehr Motorleistung ist nicht immer die bessere Wahl. Geringere Abmessungen und ein leichteres Gewicht einer kleineren Maschinenklasse können ausschlaggebend für eine höhere Gewinnungsleistung sein.

4 Berechnung eines Beispiel-Strebs

- Ein Strebbetrieb ist immer auf die Gesamtheit seiner möglichen Engpässe zu untersuchen. Wird ein Engpass entdeckt und dieser z. B. durch eine größere Maschine mit stärkerem Motor behoben, kann der als nächster anstehende Engpass zu einer nur marginalen Steigerung der Gewinnungsleistung führen, wie es das Bi-di in dem Beispiel oben zeigt.

*„Ideen, wie absolute Gewissheit, absolute Genauigkeit, endgültige Wahrheit
und so fort, sind Erfindungen der Einbildungskraft und
haben in der Wissenschaft nichts zu suchen.“*

Max Born (1882-1970), deutscher Mathematiker und Quantenphysiker

5 Kalibrierung und Verifizierung der Strebbausimulation in der Praxis

Eine Kalibrierung und anschließende Verifizierung in der Praxis ist ein wichtiger Bestandteil der Anwendung und Einführung von Berechnungsalgorithmen zur Planung in einem Unternehmen. Das Ziel der Kalibrierung und Verifizierung ist die Überprüfung der Genauigkeit und somit der Verlässlichkeit des Algorithmus.

Die Kalibrierung beinhaltet die Anpassung des Algorithmus an strebspezifische Größen, wie die notwendige Schneid- und Ladeenergie der Kohle, erforderliche Andruckkräfte der Meißel und die Bewegungswiderstände des Förderers. Nach der Kalibrierung schließt sich die Verifizierung an, indem ein Vergleich von Berechnungsergebnissen mit gemessenen Förderzahlen durchgeführt wird.

5.1 Ort und Art der Kalibrierung und Verifizierung

Die Verifizierung fand mit Daten über 5,5 Wochen eines nordamerikanischen Steinkohlenbergwerks des nördlichen Appalachen-Reviers im Herbst 2006 statt. Im Jahr der Kalibrierung förderte es insgesamt 5,3 Mio. t Steinkohle [RMG_2007] aus einem Bi-di Streb von ca. 440 m Länge.

Die Kalibrierung und Verifizierung beinhaltete:

- die Überprüfung, ob das angewandte Schnittverfahren mit dem in dem Algorithmus abgebildeten Schnittverfahren übereinstimmt, und ob die automatisch aufgezeichneten Walzenladerbewegungen korrekt sind und sich somit für die Verifizierung eignen.
- die Sammlung und Aufbereitung von Daten des Walzenladers und des Strebförderers zur Berechnung der spezifischen Schneidarbeit, der spezifischen Andruckkraft und der Bewegungswiderstände des Ober- und Untertrums im Förderer.

5 Kalibrierung und Verifizierung der Strebbausimulation in der Praxis

- die Berechnung der maximalen, durchschnittlichen und minimalen Menge an Kohle pro Walzenladerdurchfahrt und den Vergleich mit den Berechnungen des Simulationsalgorithmus.
- der Vergleich einer Schneidsequenz des simulierten Walzenladers mit denen des echten im Hinblick auf Geschwindigkeit und Gewinnungskapazität.

5.2 Überprüfung des Schnittverfahrens und der automatisch aufgezeichneten Daten

In dem Bergwerk, in dem die Verifizierung stattfand, wird das Bi-di Verfahren verwendet mit zur Strebmitte gerichtetem Einschneidevorgang. Gelegentlich finden zusätzliche Fahrten in den Bereichen der Antriebe zwecks vollständiger Räumung der Kohle statt.

Die Überprüfung geschah sowohl untertage im Streb als auch übertage anhand aufgezeichneter Daten. Im Streb wurde die Walzenladerbewegung beobachtet und die Maschinenbediener zusätzlich über den Ablauf befragt. Übertage vervollständigten die automatisch aufgezeichneten Maschinenpositionen die Informationen.

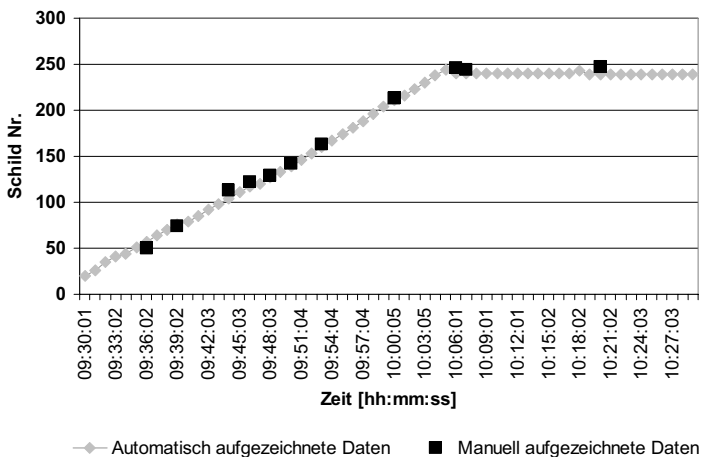


Abbildung 5-1: Vergleich automatisch aufgezeichneter mit manuell erfassten Daten

Die automatisch aufgezeichneten Daten der Walzenladerbewegung bilden die Grundlage der Verifizierung. Im Prüfzeitraum (Abbildung 5-1) bewegte sich der Walzenlader auf den Hilfsantrieb zu. Nach dem Schneiden der Kohle am Hilfsantrieb und zu Beginn der Schleifenfahrt kam der Streb zum Stillstand. Die im Diagramm übereinander geleg-

ten, manuell erfassten Maschinenpositionen passen zu den automatisch aufgezeichneten und bestätigen die Verlässlichkeit und Verwendbarkeit dieser Daten.

5.3 Bestimmung strebspezifischer Werte zur Kalibrierung des Simulationsalgorithmus

Die Kalibrierung umfasst einerseits die Kohlenhärte, die sich in einer volumenbezogenen Schneid- und Ladearbeit und einer flächenbezogenen Andruckkraft widerspiegelt, und andererseits die durchschnittlichen Bewegungswiderstände des Förderers im Ober- und Untertrum. Aus der Kohlenhärte lassen sich mögliche Marschgeschwindigkeiten aufgrund von Schneidmotorleistungen ableiten. Mit den errechneten Bewegungswiderständen des Förderers wird überprüft, ob die Kraft seiner Motoren ausreicht, um ihn voll beladen zu ziehen.

5.3.1 Volumenbezogene Schneid- und Ladearbeit

In die Berechnung der volumenbezogenen Schneid- und Ladearbeit einer bestimmten Kohle fließen die von dem grubeneigenen Datenerfassungssystem aufgezeichneten Motorströme sowie Walzenladerpositionen des Untersuchungszeitraums ein. Die im Sekundentakt vorliegenden Daten wurden aufgrund ihrer Menge auf einen Datensatz pro Minute reduziert, so dass mehr als 30.000 Datensätze zur Auswertung vorlagen. Nur die Daten, bei denen sich der Walzenlader zwischen 50 und 390 m Entfernung vom Hauptantrieb befunden hat, fließen in die weiteren Berechnungen ein. Mit der Filterung wird erreicht, dass nur die Gewinnungsfahrten einen Einfluss auf die Berechnungen haben. Die Kalkulation der volumenbezogenen Schneid- und Ladearbeit basiert auf der Annahme, dass die geschnittenen Geometrien auf der Gewinnungsfahrt für die vor- und nachlaufende Walze ideal sind. In der Realität können sie sich durch variierende Mächtigkeiten, Ausböschungen und Nachfall ändern.

Danach wurde die zurückgelegte Distanz und Geschwindigkeit des Walzenladers zwischen jedem Datensatz bestimmt. Um die volumenbezogene Schneidarbeit anhand von Stromaufnahmen der Schneidmotoren ermitteln zu können, müssen die Stromaufnahmen in Leistung umgerechnet werden. Unter der vereinfachten Annahme, dass sie sich linear zur Leistungsabgabe verhalten, ergibt sich bei einem 530 kW (710 hp) Schneidmotor mit einer Leerlaufstromaufnahme von 33 A und einer nominalen Stromaufnahme von 94 A folgende vereinfachte Umrechnungsformel (Gleichung 25):

$$P_S = \frac{I - I_{\text{leer}}}{0,1151} \quad (25)$$

P_S = Schneidleistung [kW]

I = Stromaufnahme [A]

I_{leer} = Leerlaufstromaufnahme [A]

0,1151 = Linearer Umrechnungsfaktor $\left[\frac{\text{A}}{\text{kW}} \right]$

Eine zweite Möglichkeit die aufgezeichneten Motorströme in abgegebene Leistung umzurechnen, ist die Verwendung der normierten Kennlinie von Leistungsabgabe über Stromaufnahme eines bekannten 933 kW (1.250 hp) Asynchronmotors (Anhang A10). Die bekannten Leistungsdaten ergeben angenähert ein Polynom 3. Grades (Gleichung 26 und Anhang A10), mit dem die Umrechnung erfolgt.

$$P_{\text{mech}} = 0,7407 \cdot I^3 - 2,219 \cdot I^2 + 3,0735 \cdot I - 0,6121 \quad (26)$$

P_{mech} = abgegebene mechanische Leistung [kW]

I = Stromaufnahme [A]

0,7407 = Umrechnungsfaktor $\left[\frac{\text{kW}}{\text{A}^3} \right]$

2,219 = Umrechnungsfaktor $\left[\frac{\text{kW}}{\text{A}^2} \right]$

3,0735 = Umrechnungsfaktor $\left[\frac{\text{kW}}{\text{A}} \right]$

Grundvoraussetzung für die Gültigkeit der gemessenen Stromaufnahmen ist eine konstante Netzspannung und Netzfrequenz. Die Spannungsversorgung sieht vor, dass von übertage 12,47 kV zur Verfügung gestellt werden, die am Energiezug des Strebs für den Walzenlader auf 4.160 V bei 60 Hz transformiert wird. Während der Betriebsbeobachtungen am Energiezug kam es zu Spannungsabfällen von bis zu 2,6 %. Der Spannungsabfall zwischen Energiezug und Walzenlader wurde seitens der Elektromannschaft mit maximal 2 % angegeben, so dass insgesamt ein Spannungsabfall von unter 5 % anzunehmen ist. Bei der Umrechnung von Stromaufnahme in Leistung ist diese Abweichung im tolerierten Bereich.

Danach erfolgte für jeden Schritt, differenziert in vor- und nachlaufende Walze, die Berechnung der volumenbezogenen Schneidarbeit, indem die Leistungsabgabe durch die Schnittfläche, multipliziert mit der Marschgeschwindigkeit, dividiert wurde (Gleichung 27). Bei jedem Messwert musste die Marschrichtung der Maschine Beachtung finden, um die jeweils vor- und nachlaufende Walze identifizieren zu können. Der

Grund dafür ist die unterschiedlich geschnittene Mächtigkeit der vor- und nachlaufenden Walze, sowie die unterschiedliche Ladearbeit.

$$w_S = \frac{P_S}{A_S \cdot v_M \cdot 60} \quad (27)$$

w_S = volumenbezogene Schneid – und Ladearbeit $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}\right]$

P_S = Schneidleistung [kW]

A_S = Verhiebfläche einer Walze in Abh. der Marschrichtung $[\text{m}^2]$

v_M = Marschgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{min}}\right]$

Aus den Messungen ergibt sich eine durchschnittliche Schneid- und Ladearbeit für die nachlaufende Walze von $0,51 \text{ kWh/m}^3$ und für die vorlaufende von $0,29 \text{ kWh/m}^3$. Der Durchmesser der vorlaufenden Walze beträgt ca. 1,63 m, die geschnittene Mächtigkeit der nachlaufenden Walze ca. 0,66 m. Der mit den Schneidhöhen gewichtete Mittelwert führt zu einer Schneid- und Ladearbeit bei vereinfachter linearer Umrechnung von $0,36 \text{ kWh/m}^3$.

Unter Verwendung des Polynoms liegen die durchschnittlichen Schneid- und Ladearbeiten für die nachlaufende Walze bei $0,88 \text{ kWh/m}^3$ und für die vorlaufende bei $0,42 \text{ kWh/m}^3$. Der anhand der Schneidhöhe gewichtete Durchschnitt liegt mit $0,55 \text{ kWh/m}^3$ höher als der linear errechnete Wert.

Es ist anzunehmen, dass die tatsächliche Schneid- und Ladearbeit der Kohle zwischen dem linear und polynomisch berechneten Ergebnis liegt, denn die lineare Methode ist eine Annäherung von unten. Die Umrechnung mit der normierten Kennlinie des 933 kW Asynchronmotors ist eine Annäherung von oben, da leistungsstärkere Elektromotoren einen besseren Wirkungsgrad besitzen als solche einer kleineren Leistungsklasse, wie der hier verwendete 530 kW Asynchronmotor. Die Umrechnung ergibt also eine geringfügig größere Leistung pro Stromaufnahme als bei dem verwendeten Elektromotor tatsächlich vorliegt.

Da der Berechnungsalgorithmus nur einen Mittelwert als Eingabegröße vorsieht, ist bei der Berechnung der möglichen Marschgeschwindigkeit aufgrund der Schneidmotorleistung zu berücksichtigen, dass sich der spezifische Wert für die vorlaufende Walze um ca. 20-25 % vom Durchschnitt verringert, während der Wert für die nachlaufende Walze je nach Berechnungsmethode um ca. 40-60 % höher ist. Mögliche Gründe für die höhere Stromaufnahme der nachlaufenden Walze liegen in der zusätzlichen Ladearbeit, die die nachlaufende Walze verrichten muss. Ebenso spielt die schlechte Erken-

nung der Grenzschicht von Kohle und Nebengestein durch den Maschinenfahrer und einem damit teilweise verbundenen Einschnelden in das härtere Nebengestein eine Rolle.

5.3.2 Nötige Andruckkräfte

Die flächenbezogenen Andruckkräfte ließen sich nicht in Analogie zu der Schneid- und Ladearbeit berechnen. In einem Zeitraum von sieben Stunden wurde eine maximale Marschgeschwindigkeit von ca. 18,3 m/min (ca. 60 ft/min) festgestellt. Der Walzenlader war so konfiguriert, dass er bei 85 % der maximalen Stromaufnahme der Windenmotoren die Geschwindigkeit automatisch begrenzte. Daraus ergibt sich eine errechnete Geschwindigkeit bei 100 % Stromaufnahme von 21,3 m/min (70 ft/min). Gemäß Gleichung 4 (Kapitel 3.1.3) zur Berechnung flächenbezogener Andruckkräfte unter Vernachlässigung der Steigung werden ca. 90 kN/m² benötigt, um die Meißel in die Kohle eindringen zu lassen.

5.3.3 Bewegungswiderstände des Förderers

Der Berechnungsalgorithmus überprüft, ob die installierte Leistung am Förderer ausreicht, um ihn voll beladen bewegen zu können. Die Bewegungswiderstände des Ober- und Untertrums beeinflussen u. a. dabei die Kräfte, die für die Bewegung nötig sind.

Um die Bewegungswiderstände anhand der vorliegenden Messdaten bestimmen zu können, sind folgende Annahmen zu treffen:

- Die Bewegungswiderstände des Ober- und Untertrums sind bei leerem Förderer gleich groß.
- Der Bewegungswiderstand des Untertrums verändert sich nicht mit steigender Beladung im Obertrum.
- Der Beladungsquerschnitt bleibt auf Bergfahrt konstant. Eine mögliche Erhöhung der Beladung durch Nachfall vom Stoß wird nicht berücksichtigt.
- Das geschnittene Material ist über den Streb konstant. Eine sich ändernde Geologie wird vernachlässigt.
- Zur Umrechnung von Stromaufnahme in mechanische Leistung wird das Polynom (Gleichung 26) der normierten Motorkennlinie verwendet.

Elf ausgesuchte Situationen mit einer Gesamtdauer von ca. 109 Minuten bilden die Datengrundlage. Die Filterkriterien bei der Bestimmung sind die, dass der Förderer laufen muss, während der Walzenlader sich nicht bewegen darf. Zudem muss jeder Abschnitt mindestens sechs Minuten lang sein. Bei einer Streblänge von ca. 440 m und

5 Kalibrierung und Verifizierung der Strebbausimulation in der Praxis

einer Förderergeschwindigkeit von 1,88 m/s ist bei voller Beladung der Förderer erst nach ca. vier Minuten leer. Die mindestens über zwei Minuten vorhandenen restlichen Messdaten gehen in die Berechnung des Untertrum-Bewegungswiderstands ein.

Die am Förderer installierten Asynchronmotoren sind zwei 1.230 kW (1.650 hp) Motoren am Hauptantrieb und ein 1.080 kW (1.450 hp) am Hilfsantrieb mit Leerlaufstromaufnahmen von 50 A bzw. 40 A und Stromaufnahmen im Nennbetriebspunkt von 192 A. Zuerst wurde die durchschnittliche Stromaufnahme der im Minutentakt vorliegenden Daten bestimmt und auf die maximale Stromaufnahme normiert. Danach wurde anhand der Referenz-Motorkennlinie (Anhang A10) die jeweils abgegebene Leistung kalkuliert. Die Leistungen der drei Motoren ergibt in Summe die Gesamtleistung an der Fördererkette, aus der sich nach der folgenden Gleichung 28 der Bewegungswiderstand im Ober- und Untertrum errechnet. Der durchschnittliche Bewegungswiderstand aller Leerlaufsituationen beträgt für die gemessenen Zeiträume 0,28.

$$\mu = \frac{P_K \cdot \eta}{m_K \cdot g \cdot v_K} \quad (28)$$

μ = Bewegungswiderstand

P_K = Leistung an der Kette [W]

η = Wirkungsgrad

m_K = Kettenmasse [kg]

g = Erdbeschleunigung $\left[\frac{\text{N}}{\text{kg}} \right]$

v_K = Kettengeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Für die Bestimmung des Bewegungswiderstands im Obertrum wurden 25 Walzenladerfahrten vom Hauptantrieb zum Hilfsantrieb aus den Messdaten ausgewählt (Anhang A9), in denen der Walzenlader eine konstante Geschwindigkeit ohne Zwischenstopps gefahren ist. Es wird angenommen, dass dadurch ein annähernd konstanter Beladungsquerschnitt entstand, aus dem sich die Gesamtbeladung auf dem Förderer errechnen lässt. Zusammen mit den Massen der Ketten und Mitnehmer ergibt sich eine Gesamtmasse für den Ober- und Untertrum.

Wie bei der vorangegangenen Berechnung werden die Stromaufnahmen zu einer Gesamtleistung an der Kette umgerechnet. Über die Kettengeschwindigkeit ist die Zugkraft zu bestimmen, aus der sich zusammen mit der bekannten Masse der Bewegungswiderstand im Obertrum ergibt (Gleichung 29).

$$\mu_o = \frac{P_K \cdot \eta - F_{gu} \cdot \mu_u \cdot v_K}{F_{go} \cdot v_K} \quad (29)$$

μ_o = Bewegungswiderstand im Obertrum

P_K = Leistung anliegend an der Kette [W]

η = Wirkungsgrad

F_{gu} = Gewichtskraft der Massen im Untertrum [N]

μ_u = Bewegungswiderstand im Untertrum

v_K = Kettengeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$

F_{go} = Gewichtskraft der Massen im Obertrum [N]

In dem Diagramm der errechneten Bewegungswiderstände des Obertrums über der Walzenladerposition im Streb (Abbildung 5-2) wird deutlich, dass sich die Werte bis auf wenige Ausnahmen zwischen 0,18 und 0,6 bewegen. Das arithmetische Mittel liegt bei 0,41. Soll der ungünstigste Fall berechnet werden, ist ein Bewegungswiderstand von 0,6 für den Ober- und 0,28 für den Untertrum zu wählen.

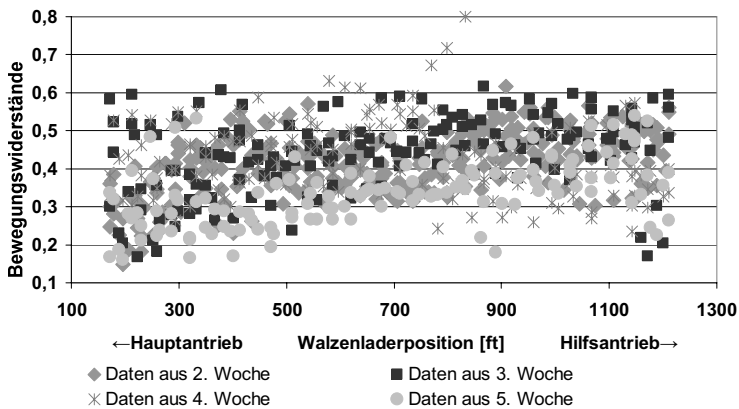


Abbildung 5-2: Errechnete Bewegungswiderstände im Obertrum in Abhängigkeit von der Walzenladerposition

5.4 Kohlenmenge pro Gewinnungsfahrt und Walzenladerposition

Zwei Vergleiche von berechneten und gemessenen Daten dienen zur Bestimmung der Genauigkeit des Berechnungsalgorithmus. Zum einen wurden die maximale, durchschnittliche und minimale Menge an Kohle pro Walzenladerdurchfahrt an Tagen mit konstanten Walzenladerfahrten ermittelt. Zum anderen fand ein Abgleich von berechneten und gemessenen Walzenladerbewegungen statt.

5.4.1 Maximale, durchschnittliche und minimale Kohlenmenge pro Walzenladerdurchfahrt

Datengrundlagen für die Berechnung der Kohlenmenge pro Walzenladerdurchfahrt bilden sieben ausgesuchte Tage aus vier unterschiedlichen Wochen (Anhang A9). Das Kriterium, wonach die Tage für den Vergleich in Frage kamen, war eine möglichst ideal verlaufende Walzenladeroperation während des gesamten Tages. Die von einer Bandwaage am Steigungsband ermittelten Daten über die geförderte Menge, bereinigt von der Streckenvortriebsmenge, wird durch die Anzahl der Walzenladerfahrten dividiert. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Menge an Kohle pro Fahrt. Aus den Werten der sieben Messtage wird der Durchschnitt gebildet, der mit dem Wert des Berechnungsalgorithmus verglichen wird.

Beispielsweise erreichte der Walzenlader an einem der Messtage fast zehn Berg- und zehn Talfahrten (19,99 Fahrten). Insgesamt förderte das Bergwerk an dem Tag 33.352 t, wovon 2.240 t dem Streckenvortrieb zuzuschreiben waren. Demnach verteilen sich die restlichen 31.111 t auf die 19,99 Fahrten mit dem Ergebnis von 1.556 t pro Walzenladerfahrt. Über alle sieben Messtage ergaben sich durchschnittlich 1.615 t pro Walzenladerfahrt (Abbildung 5-3). Der Simulationsalgorithmus ermittelt eine Fördermenge von 1.708 t pro Fahrt. Damit liegt er um ca. 5,8 % über dem Durchschnitt der sieben Messtage, um etwa 1,7 % unterhalb des größten gemessenen Werts von 1.737 t und um fast 10 % über dem kleinsten gemessenen Wert von 1.553 t. Diese Abweichung ist gering, er Berechnungsergebnis ist somit sehr genau und bestätigt die Eignung des Algorithmus. Wäre die Eingabe der Schnitttiefe und geschnittenen Mächtigkeit um jeweils ca. 2 cm geringer gewesen, hätte es eine 100 %-Übereinstimmung des gemessenen und berechneten Durchschnittswertes gegeben.

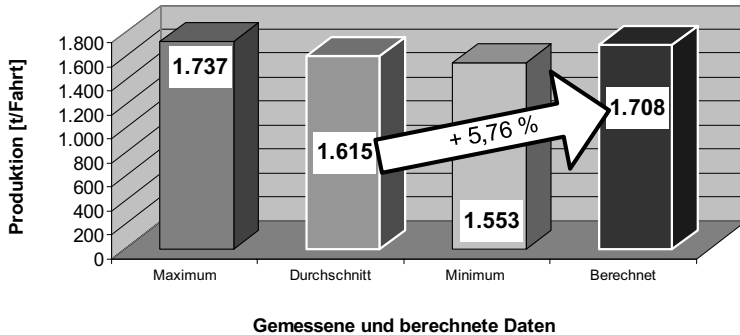


Abbildung 5-3: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Förderzahlen

5.4.2 Walzenladerbewegung

Im Vergleich der automatisch aufgezeichneten Walzenladerpositionen mit der berechneten Bewegung durch den Algorithmus zeigt sich, dass die Simulation nah an die Realität reicht (Abbildung 5-4). Die aufgezeichneten Strebdaten weisen eine Strebrandoperation von ca. 12 Minuten aus. Die durchschnittliche Geschwindigkeit im Strebrandbereich beträgt ca. 7,4 m/min, die durchschnittliche Schneidgeschwindigkeit ca. 8,9 m/min. Die insgesamt benötigte Zeit für einen Schneidzyklus beläuft sich auf eine Stunde und 53 Minuten. Weil die abgeförderte Kohlenmenge für diese beiden Fahrten nicht gemessen werden konnte, muss der Vergleich mit der zuvor berechneten durchschnittlichen Kohlenmenge von 3.230 t für einen Schneidzyklus gemacht werden. Mit der Gesamtzykluszeit ergibt sich somit eine Kapazität von 1.714 t/h.

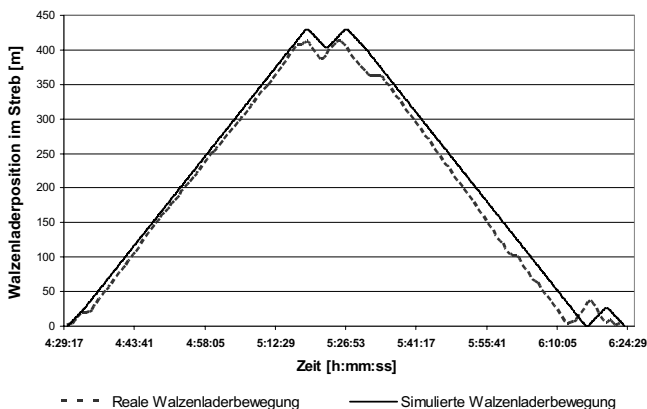


Abbildung 5-4: Vergleich tatsächlicher mit berechneter Walzenladerposition

5 Kalibrierung und Verifizierung der Strebbausimulation in der Praxis

Der Berechnungsalgorithmus kalkulierte in diesem Beispiel ca. 130 t weniger Kohle bei einer um ca. 77 Sekunden längeren Zykluszeit. Die errechnete Kapazität von 1.627 t/h liegt deshalb nur um ca. 5,1 % unterhalb der gemessenen Kapazität.

„EDV-Systeme verarbeiten, womit sie gefüttert werden.

Kommt Mist rein, kommt Mist raus.“

André Kostolany (1906–1999), ungarischer Börsenexperte

6 Diskussion der Strebbausimulation

Das folgende Kapitel diskutiert die in dieser Arbeit entwickelte Strebbausimulation. Es werden die Vorteile des Algorithmus und der Nutzen für den Anwender vorgestellt, aber auch die Schwachstellen und Ungenauigkeiten behandelt. Abschließend fasst ein Fazit die Vor- und Nachteile zu einem Gesamturteil über diese Strebbausimulation zusammen.

6.1 Bewertung der Strebbausimulation

Die beschriebene Strebbausimulation und ihre Umsetzung in einem Tabellenkalkulationsprogramm ist neuartig und weltweit einmalig. Sie ist in der Lage, genaue Kapazitätsberechnungen von Walzenladerstrebbetrieben anhand von ca. 70 Eingabeparametern unter Berücksichtigung der derzeit gängigen Schnittverfahren im globalen Strebbau durchzuführen. Darüber hinaus unterstützt sie die Planungsingenieure in der Auswahl und Analyse von Betriebsmitteln, deckt Engpässe im System Streb auf, prognostiziert Verbesserungspotenziale bei Änderungen sowohl an der Maschinenausstattung als auch an der Verfahrenstechnik und ermöglicht ein besseres Verständnis für die Zusammenhänge in der Strebplanung. Die Abbildung 6-1 listet die verwendeten Kriterien dieser Bewertung auf und zeigt graphisch, in wie weit der entwickelte Algorithmus das Kriterium erfüllt.

- Verständnis für das komplexe System eines Walzenladerstrebs

Der Strebbau ist ein komplexes System, so dass Kalkulationen oftmals viel Zeit in Anspruch nehmen. Dieser Algorithmus verkürzt die Zeit der Planung und fördert anhand der Berechnungsergebnisse das Verständnis für das System Strebbau, insbesondere des Einflusses einzelner Parameter auf die Gewinnungsleistung.

- Sicherheit bei Entscheidungsprozessen

Die Strebbausimulation besitzt einen Detaillierungsgrad und Umfang, der derzeit von keinem anderen Algorithmus im Bereich Strebbau erreicht wird. Durch die Eingabe veränderter Parameter kann der Benutzer schnell die Auswirkung von z. B. einer sich ändernden Geologie aufklären und prüfen, ob z. B. die Erhöhung der Streblänge einen

6 Diskussion der Strebbausimulation

signifikanten Einfluss auf das Jahresergebnis hat. Auf dieser Basis lässt sich eine eventuelle Neuanschaffung entsprechender Betriebsmittel bewerten. Der Berechnungsalgorithmus bietet demnach eine große Unterstützung bei Entscheidungsprozessen.

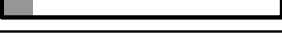
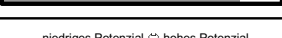
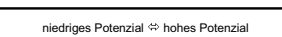
Priorität	Kriterium	Bewertung		
		schlecht	↔ gut	
1	Verständnis für komplexes System Streb	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
2	Sicherheit bei Entscheidungsprozessen	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
3	Genauigkeit der Ergebnisse	ungenau ↔ genau 		✓
4	Kostenersparnis	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
5	Flexibilität der Simulation	statisch ↔ flexibel 		✗
6	Zeitersparnis	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
7	Aufdecken von Engpässen u. Potenzialen	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
8	Kunden und Nachfrage vorhanden	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
9	Erweiterungsfähigkeit in Excel	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✗
10	Erweiterungsfähigkeit auf anderer Basis	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
11	Massenstromdarstellung	niedriges Potenzial ↔ hohes Potenzial 		✓
12	Alle Schnittverfahren abgebildet	unvollständig ↔ vollständig 		✓
13	Einfache Handhabung	kompliziert ↔ einfach 		✓

Abbildung 6-1: Vor- und Nachteile dieser Strebbausimulation

- Genauigkeit des Algorithmus

Die Überprüfung dieser Berechnungsmethode und ihrer Ergebnisse anhand von realen Förderzahlen deckte eine geringe Abweichung der Simulation von der Realität in einer Größenordnung von weniger als 6 % auf (Kapitel 5.4.1). Die Simulation geht zwar von einer idealen Walzenladerbewegung sowie geschnittenen Geometrie aus, jedoch unter Eingabe von durchschnittlichen Parametern ist der Benutzer in der Lage, eine durchschnittlich zu erzielende Leistung des Strebs zu prognostizieren. Das Kalkulationsergebnis wird auf eine Stunde, auf einen Monat und auf ein Jahr bezogen angegeben.

- Kostenersparnis

Der Algorithmus bietet eine Hilfe für eine Kosten-Nutzen-Rechnung bei Investitionen in die Maschinentechnik. Da nicht immer eine Neuanschaffung oder Aufrüstung von Betriebsmitteln eine Steigerung der Systemleistung bewirkt, sondern eine Anpassung der Verfahrenstechnik die Gewinnungskapazität vermehren kann (Kapitel 4.2), besitzt der Algorithmus ein großes Potential in Bezug auf Kosteneinsparung.

- Flexibilität der Simulation

Der Hauptnachteil des Algorithmus liegt in dem statischen Aufbau, der genau die abgebildeten Verfahren berechnen kann, aber keine Variationen zulässt. Benutzt ein Strebbetrieb ein neues Schnittverfahren, bzw. andere Varianten, muss der Algorithmus durch den Entwickler angepasst werden. Der Benutzer hat nicht die Möglichkeit, Anpassungen selbst vorzunehmen.

Statisch verhalten sich auch die geologischen Parameter im Streb. Sie können nicht jedem einzelnen Verfahrensschritt individuell zugeordnet werden, sondern gelten für den gesamten Streb. Schwankungen von z. B. der Flözmächtigkeit werden durch die Eingabe eines Strebdurchschnittswerts lediglich angenähert.

Ungünstig ist ebenfalls, dass innerhalb der festgelegten Verfahrensschritte jeweils nur eine konstante Walzenladergeschwindigkeit angenommen wird. Bei den kurzen Verfahrensschritten mit Richtungsumkehr im Strebrandbereich ist der Einfluss von den vernachlässigten Beschleunigungen und Abbremsvorgängen relativ groß im Vergleich zur langen Hauptgewinnungsfahrt. Es wird also bei den Strebrandbereichen tendenziell eine höhere Marschgeschwindigkeit angenommen, als in dem Verfahrensschritt tatsächlich durchschnittlich gefahren wird.

- Zeitersparnis

Der Algorithmus verkürzt die Planungs- und Analysezeit. Wenn einmal ein Parametersatz eingegeben ist, lassen sich mit wenigen Änderungen der Eingabewerte neue Planungsszenarien schnell erstellen und auswerten.

- Aufdecken von Engpässen und Steigerungspotenzialen

Der Berechnungsalgorithmus bietet dem Benutzer Unterstützung in der Analyse von bestehenden Strebbetrieben und bei der Erstellung von Planungsszenarien. Durch die Berechnung theoretisch möglicher Marschgeschwindigkeiten aufgrund von Engpässen weist der Algorithmus den Benutzer auf die begrenzende Größe hin und zeigt auch an, wie viel Steigerung in der Gewinnungskapazität zu erwarten ist, bis der nächste Engpass auftritt.

- Kunden und Nachfrage vorhanden

Der Strebbau, dessen Vorteil die hohe Produktivität bei gleichzeitiger Sicherheit ist, ist eine weltweit eingesetzte Abbaumethode mit hervorragenden Zukunftsaussichten. Die Nachfrage nach computergestützten Planungshilfen seitens der Bergbaubetreiber ist generell vorhanden, so dass dieser Simulation ein hohes Marktpotential zugesprochen werden kann.

- Erweiterungsfähigkeit in Excel

Excel ist als Softwareplattform für diesen umfangreichen Algorithmus mit dem Stand des Abschlusses dieser Arbeit noch verwendbar, jedoch ist ein Ausbau der Simulation in Excel nicht zu empfehlen. Die tabellarische Darstellung der Berechnungsschritte bietet wenig Übersichtlichkeit, wodurch eine Wartung und Bearbeitung erschwert ist.

- Erweiterungsfähigkeit auf anderer Softwarebasis

Anstatt Excel erscheint eine objektorientierte Programmiersprache für die Zukunft des Simulationsalgorithmus als besser geeignet (siehe Kapitel 7.1.1).

- Massenstromdarstellung

Auf der Simulation der Walzenladerbewegungen aufbauend errechnet der Algorithmus die Massenströme der gängigen Schnittverfahren, die vom Hauptantrieb in Richtung übertage durch das Bergwerk und eventuell durch einen Bunker gefördert werden. Die Diagramm-Darstellungen von Kapazitäten der Schnittverfahren ermöglichen es, die Bandanlagen für die auftretenden Massenströme auszulegen und Bunkerkapazitäten auf ihre Eignung zu prüfen. Der Vergleich der Schnittverfahren veranschaulicht ihre abwechselnden Charakteristika, ob sie viele Kapazitätsspitzen aufweisen oder eher durch gleichmäßigen Materialfluss geprägt sind.

Die Simulation zweier Strebbetriebe berechnet die zulässigen Marschgeschwindigkeiten – und somit den zulässigen Massenstrom – eines Walzenladers aufgrund eines anderen Massenstroms auf einem gemeinsamen Förderband. Dadurch lassen sich beide Strebbetriebe bestmöglich aufeinander abstimmen, ohne dass es zu Überfüllungen oder Leerläufen kommt. Durch diese intelligente Nutzung der ursprünglich für einen Streb ausgelegten Bergwerks-Infrastruktur ergeben sich große Einsparpotenziale in Bezug auf Neuanschaffungen.

- Alle Schnittverfahren abgebildet

Wie bereits o. g. beinhaltet der Simulationsalgorithmus die fünf weltweit gängigen Walzenlader-Schnittverfahren und deckt somit die Verfahrenstechnik vollständig ab, mit Einschränkung in Bezug auf die Varianten der Schnittverfahren.

- Einfache Handhabung

Durch die Vielzahl der Parameter ist es wichtig, dass dem Benutzer im Umgang mit dem Algorithmus Unterstützung zukommt, so dass er jederzeit den Überblick über den Datensatz hat und schnell auf die benötigten Werte zugreifen kann. Eingabemasken strukturieren und erklären die Parameter, so dass überwiegend ein intuitiver Umgang mit dem Algorithmus möglich ist. Zusätzlich überprüft eine im Hintergrund laufende Plausibilitätsprüfung die Eingabewerte auf ihre Gültigkeit und weist ggf. den Benutzer auf Unstimmigkeiten in seinen Eingaben hin.

6.2 Das Fazit zur Strebbausimulation

Weil der Strebbau als komplexe Abbaumethode eine computergestützte Planungshilfe benötigt, ist dieser weltweit einmalige Simulationsalgorithmus bestens geeignet. Er prognostiziert mit hoher Genauigkeit die Kapazität von Strebbetrieben, analysiert sie, deckt Verbesserungspotenziale in der Verfahrenstechnik und maschinentechnischen Ausstattung auf, simuliert Massenströme mit Bunkern und sogar das Zusammenspiel zweier Strebbetriebe.

Planungsingenieure müssen permanent Entscheidungen auf der Grundlage von Berechnungen treffen. Dieser Simulationsalgorithmus gibt durch seine Berechnungsergebnisse und analytischen Funktionen Sicherheit, die richtigen Entscheidungen zu treffen.

*„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft,
denn in ihr gedenke ich zu leben.“*

Albert Einstein (1879-1955), deutscher Physiker

7 Ausblick

7.1 Ausblick für den Berechnungsalgorithmus

Der Hochleistungsstrebbau ist ein Zukunftsmarkt. Durch hohe Produktivität, verbunden mit hoher Sicherheit für die Belegschaft wird er zunehmend eine wichtigere Rolle bei der Gewinnung von Kohle in mittleren und hohen Flözmächtigkeiten einnehmen. Aufgrund von wirtschaftlichen Vorgaben durch steigenden Wettbewerbsdruck und Gewinnerwartungen müssen Abbaubetriebe noch effektiver werden. Das ist nur möglich, wenn sie vorab sorgfältig planen und durch Simulation optimiert arbeiten. Die in dieser Arbeit behandelte Simulation liefert verlässliche Lösungen für diese Anforderungen, und bietet damit Ansätze für einen weiteren Ausbau.

7.1.1 Objektorientierte Programmierung als neue Basis

Excel bietet eine Plattform für schnelle Umsetzungen von Algorithmen in Form einer Tabellenkalkulation. Der hier behandelte Simulationsalgorithmus ist jedoch in seiner Entwicklung soweit vorangeschritten, dass er zu komplex für eine Tabellenkalkulation geworden ist.

Eine höhere Flexibilität in der Abbildung der in Teilschritte eingeteilten Schnittverfahren, die Visualisierung von mehreren zusammengeführten Massenströmen, eine Vervielfachung der Anzahl der Betriebsmittel durch mehrere parallel laufende Strebbetriebe, eine Verbesserung der Bedienbarkeit, Wartungsfreundlichkeit, Geschwindigkeit und Stabilität erfordert eine programmierte Lösung. Die objektorientierte Programmierung (OOP) scheint in Verbindung mit der Unified Modeling Language (UML) geeignet zu sein, Excel als Softwarebasis abzulösen.

Die Vorteile der OOP mit UML sind:

- Graphische Benutzeroberfläche bei der Erstellung der Softwarearchitektur
- Schnelle Korrekturen und Wartung der Simulation
- Schnelle und unbegrenzte Erweiterung und Vervielfachung von Betriebsmitteln

- Höhere Flexibilität in der Einteilung der Verfahrensschritte und somit eine bessere Anpassung der Schnittverfahren an individuelle Gegebenheiten
- Anbindungsmöglichkeit an die Status-basierte²¹ Programmierung von Walzenladern
- Größere Stabilität des Programms
- Höhere Rechengeschwindigkeiten durch bessere Computerr Ressourcennutzung

7.1.2 Erweiterungspotenzial des Algorithmus

In der Berechnung der Marschgeschwindigkeit aufgrund möglicher Engpässe sind die Walzen, der Schildausbau, die Bewetterung und der Streckenvortrieb noch unberücksichtigt und bieten deshalb ein vielfältiges Erweiterungspotenzial. Zudem gibt es Simulationsbedarf beim Abbau mit anderen Methoden auf sehr große und sehr kleine Flözmächtigkeiten.

Die Meißelbestückung und das Design der Schneidwalzen können eine Begrenzung darstellen, denn mit der Schnitttiefe pro Walzenumdrehung und der Walzendrehzahl lässt sich eine theoretische Vorschubgeschwindigkeit errechnen, wobei die Ladefähigkeit der Schraubengänge nicht vernachlässigt werden darf. Führt der Walzenlader schneller, als die Meißel die Kohle schneiden und die Schraubengänge laden können, kommt es zur übermäßigen Stromaufnahme der Schneidmotoren, so dass je nach Softwareausstattung des Walzenladern die Marschgeschwindigkeit automatisch reduziert wird.

Der Schildausbau und der Förderer können beim Rückvorgang eine zeitliche Begrenzung darstellen. Üblicher Weise rückt der Schildausbau und der Förderer nach der Vorbeifahrt des Walzenladern vor, so dass dieser seine Fahrt in die Gegenrichtung erst aufnehmen kann, wenn Schilde und Förderer den Rückvorgang abgeschlossen haben. Bei einer schnellen Gewinnungsfahrt kann es vorkommen, dass nach Richtungsumkehr am Strebende der Walzenladern auf Beendigung des Rückvorgangs warten muss.

Während des Abbaus von Kohle tritt Methan aus ihr aus. Unter Umständen ist eine Begrenzung der Gewinnungsleistung, also der Marschgeschwindigkeit des Walzenladern erforderlich, um die Menge von austretendem Methan zu begrenzen.

Zunehmend werden Strebbetriebe leistungstärker und erreichen Abbaufortschritte, die die Vortriebsleistungen der begleitenden Streckenvortriebe²² übersteigt. Die Strebbau-

²¹ „State Based“: Abschnittsweise wird dem Walzenlader ein Zustand wie z. B. die Tragarmstellung zugewiesen.

7 Ausblick

simulation muss dann die Streckenauffahrung in die möglichen Engpässe aufnehmen und eine maximale Marschgeschwindigkeit des Walzenladers aufgrund dieser Vortriebsleistung errechnen.

Der Abbau von mächtigen Flözen mit dem Abzugsverfahren LTCC (siehe Abbildung 2-2) hat in Australien gerade begonnen. Es ist zu erwarten, dass diese vor allem in China eingesetzte Methode sich weiter bei hohen Flözmächtigkeiten verbreitet und deshalb eine Nachfrage nach der Simulation dieses Verfahrens existiert.

Auf der anderen Seite gibt es Flöze, die nicht mehr mit Walzenladertechnik abgebaut werden können, deren Abbau sich wegen der guten Kohlenqualität trotzdem lohnt. Im Strebbau kommen dann Hobelanlagen zum Einsatz, deren Gewinnungskapazität auch simuliert werden kann.

²² Gemeint sind die international üblichen mehreren Begleitstrecken an jeder Seite des Baufelds.

*„Wenn die anderen glauben, man ist am Ende,
so muss man erst richtig anfangen.“*

Konrad Adenauer (1876-1967), deutscher Politiker und Alt-Bundeskanzler

8 Zusammenfassung

Das Thema dieser Arbeit ist ein neu entwickelter Algorithmus zur Simulation von Walzenlader-Strebbetrieben, einer Abbaumethode, die zumeist in der Kohle zum Einsatz kommt. Der Rohstoff Kohle wird hauptsächlich in der Strom- und Stahlerzeugung eingesetzt. Er stellte im Jahr 2005 mit einem Anteil von ca. einem Viertel des Primärenergieverbrauchs direkt hinter dem Öl mit ca. einem Drittel eine der tragenden Säulen der Energiewirtschaft. Dadurch, dass die Kohle von allen fossilen Energieträgern die größten Reserven vorweist, besitzt sie mit ca. 137 Jahren (Stand 2006) die längste statische Lebensdauer, weit vor den 40-60 Jahren des Öls und Gas. Obwohl die Fördermenge von 5,3 Mrd. t Hartkohle in den folgenden 24 Jahren jährlich um ca. 1,8 % steigen soll, wird der Kohle aufgrund ihrer großen Ressourcenmenge eine dynamische Lebensdauer von 160-190 Jahren zugeschrieben.

Kohle kommt zu ca. 40 % aus Tagebauen und zu ca. 60 % aus Bergwerken untertage, bei denen als Abbaufverfahren der Kammer-Pfeiler-Bau, der Örterbau und der Strebbau eingesetzt wird. Die Hochleistungsstreibetriebe zeichnen sich durch eine ca. 30 % größere Produktivität als der Untertagedurchschnitt aus und besitzen gleichzeitig die niedrigsten Unfallzahlen (USA 2006 bzw. 2008).

Weltweit förderten Bergwerke mit Strebbetrieben ca. ein Drittel der untertägig gewonnenen Kohle, die restliche Menge stammt aus den anderen Abbaumethoden. Weil zunehmend die Anforderung an Sicherheit und höherer Produktivität bei der Gewinnung von Rohstoffen steigt, wird der Strebbau seinen Anteil vergrößern können.

Walzenlader-Strebbetriebe bestehen aus den Komponenten

- Walzenlader zum Lösen und Laden des Wertminerals
- Förderer zum Abfördern der gelösten Massen
- Schildausbau zum Sichern des Abbauraums

Derzeit gibt es fünf verschiedene Walzenlader-Schnittverfahren, die sich in ihrer Schnitttiefe bzw. Schneidhöhe pro Maschinendurchfahrt und der damit zusammenhängenden Charakteristik in u. a. Gewinnungskapazität, Marschgeschwindigkeit und Fördererbelas-

dung unterscheiden. Der in Excel umgesetzte Algorithmus zur Strebbausimulation, Kapazitätsberechnung und Systemanalyse teilt den Streb gemäß der verschiedenen Walzenladerbewegungen in geometrische Körper ein, die virtuell vom Walzenlader in Abhängigkeit seiner Geschwindigkeit gelöst und auf den Förderer geladen werden. Die Zeit, die der Walzenlader dafür benötigt, hängt von seiner Marschgeschwindigkeit ab, die wiederum von mehreren möglichen begrenzenden Faktoren beeinflusst wird. (z. B. Schneidmotorleistung). Das Verhältnis der gelösten Gesamtmasse zur dafür benötigten Zeit ergibt die stundenbezogene Kapazität des Strebs, die mit Arbeitszeiten und durchschnittlichen Verfügbarkeiten zur Jahresfördermenge kalkuliert wird.

Dadurch, dass der Simulationsalgorithmus die denkbaren Engpässe prüft und aufdeckt, sind Analysen von Strebbetrieben mit Bewertung der Potenziale zur Steigerung der Produktion möglich. Zudem kann der Simulationsalgorithmus von allen Schnittverfahren die Massenströme auf dem Förderer darstellen und die Auslastung der nachfolgenden Förder- und Speichermittel bestimmen. Der Aufbau eines zweiten Strebbetriebs im Algorithmus ermöglicht die Simulierung von zwei zeitgleich auftretenden Massenströmen auf einem gemeinsamen Förderband, mit der Möglichkeit, einen der Walzenlader automatisch gemäß der Bandbeladung des anderen zu steuern, damit das Band optimal gefüllt ist.

Der Algorithmus wurde in einem nordamerikanischen Bergwerk des Appalachen-Reviere kalibriert und verifiziert. Die Kalibrierung bestimmte die spezifische Schneid- und Ladearbeit der Kohle, die spezifische Andruckkraft und die Bewegungswiderstände im Förderer. Das Verifizierungsprogramm verglich die virtuelle Walzenladerbewegung mit der real durchgeführten sowie die kalkulierte Menge und tatsächliche Menge an Kohle pro Walzenladerdurchfahrt. Die Untersuchungen ergaben einen geringen Unterschied zwischen den Durchschnittswerten aus Simulation und Realität im Bereich von weniger als 6 %.

Bei den meisten Bewertungskriterien in der Diskussion schneidet der Algorithmus sehr gut bis gut ab, dabei ist die Genauigkeit besonders positiv hervorzuheben. Lediglich der statische Charakter des Algorithmus und die nicht zu empfehlende Erweiterbarkeit auf der Basis von Excel bilden ein Manko. Zusammengefasst ist der Algorithmus mit seinen Merkmalen weltweit neu und einzigartig und besitzt ein hohes Potenzial, nicht zuletzt durch die Eignung, Produktionssteigerungen alleine durch Wechsel zu einer intelligenten Verfahrenstechnik aufzuzeigen.

Weiterentwicklungen des Algorithmus können die Integration des Walzendesigns, des Schildausbaus, der Bewetterung und des Streckenvortriebs als mögliche begrenzende Größen sein, sowie die Erweiterung auf andere Strebbauverfahren wie das Hangend-

8 Zusammenfassung

abzugsverfahren oder Hobelbetriebe. Als Softwarebasis wird eine objektorientierte Programmiersprache empfohlen, die eine flexiblere und bearbeitungsfreundlichere Umgebung bietet.

„Weil jeder Diamant nur Kohle ist, glaubt jede Kohle Diamant zu sein.“

Emil Rittershaus (1834-1897), westfälischer Lyriker und Rezitator

Bergmanns-Glossar

Abbaurichtung

die; Richtung, in dem der Abbaubetrieb voranschreitet; nicht zu verwechseln mit der Verhiebrichtung: im mechanisierten StREBBau stehen Abbaurichtung und Verhiebrichtung senkrecht zueinander

Alte Mann

der; Bruchraum, der hinter dem Abbau entsteht

Auffahren

das; bergmännisches Erstellen eines Hohlraums im Gebirge

Aus- und Vorrichtung

die; vorbereitende Maßnahmen zum Abbau vom Wertmineral wie der Bau von Schächten und Strecken

Baufeld

das; rechteckiger Wertmineral-Bereich beim StREBBau, eingegrenzt auf den kurzen Seiten vom Streb bzw. der Basisstrecke und zu den langen Seiten von den Abbaubegleits Strecken

Beibrechende

das; siehe Nebengesteinsmitschnitt

Einfallen

das; Richtung der größten Höhenänderung abwärts bei einer schrägen Ebene, senkrecht zur Streichrichtung

Fahrweg

der; Bewegungsbereich für Bergleute zu Fuß untertage; teilweise auch der Bewegungsbereich von Maschinen

Feste

die; stehen gelassenes Wertmineral oder Nebengestein zum Abstützen der Deckschichten; im Gegensatz zum Pfeiler bleibt die Feste stehen, wird also nicht heringewonnen

Flöz

das; horizontal abgelagerte und flächenmäßig ausgebreitete Schicht aus Kohle

Förderberg

der; Hohlraum mit Gefälle, ausgestattet mit Bandanlage zwecks Förderung von Material aus tieferem in höher gelegenes Niveau

Gewinnen

das; Abbauen

Glückauf

das; Gruß der Bergleute, Wunsch für das sichere Ausfahren aus der Grube oder das Aufweiten der Erzgänge zwecks gesteigerter Ausbeute

Hangende

das; Nebengesteins-Schichten oberhalb des Wertminerals

Haufwerk

das; aus dem Gebirgsverband gelöstes Wertmineral oder Nebengestein

Hereingewinnen

das; siehe Gewinnen

Hobel

der; Betriebsmittel zum Lösen und Laden von Wertmineral und Nebengestein; schälende Gewinnung

Kettenkratzerförderer

der; Betriebsmittel zum Abfordern von gelöstem und geladenem Material

Liegende

das; Nebengesteins-Schichten unterhalb des Wertminerals

nachgeschaltet

nachfolgend

Nebengestein

das; Gebirgsmaterial, welches das Wertmineral umgibt

Nebengesteinsmitschnitt

der; Lösen von unerwünschtem, mineralischem Material zusammen mit dem Wertmineral

Pfeiler

der; stehen gelassenes Wertmineral oder Nebengestein zum Abstützen der Deck-schichten; im Gegensatz zur Feste wird der Pfeiler später abgebaut

Schacht

der; vertikaler Hohlraum von der Tagesoberfläche bis in die Tiefe; wenn kein Anschluss an die Tagesoberfläche, dann Blindschacht genannt

Schild

der; auch Schildausbau; Betriebsmittel zum temporären Sichern des Hohlraums im Streb, mit Hydraulikzylindern ausgestattet

Schildeseule

die; Gesamtheit aller Schilde im Bereich eines Strebs

Schildkappe

die; Teil eines Schilds; Schutzplatte

Stempel

der; auch Hydraulikstempel; großer Hydraulikzylinder, der die Hauptstützkraft beim Schild aufbringt

Stoß

der; entweder seitliche Wand in der Strecke oder Front, an der der Abbau stattfindet

Streb

der; langfrontartiger Abbauraum, zumeist für den Abbau mittels Walzenlader oder Hobel

Strecke

die; horizontal ausgerichteter, bergmännisch aufgefahrener Hohlraum; tunnelähnlich

Streckenvortrieb

der; Betriebspunkt und Ort, an dem eine Strecke aufgefahren wird

Streichen

das; Höhenlinie einer schrägen Ebene; senkrecht zum Einfallen

Streichrichtung

die; Richtung der Höhenlinie einer schrägen Ebene, senkrecht zur Richtung des Einfallens

Teufe

die; relative Tiefe, gemessen von der Tagesoberfläche

Unverritzte Stoß

der; Abbaufont, die noch nicht bearbeitet wurde

Vergleichmäßigung

die; gleichmäßig und konstant machen

Verhieb

der; Abbauvorgang

Verhiebrichtung

die; Richtung des Werkzeugs bzw. des Betriebsmittels zum Lösen des Wertminerals, nicht zu verwechseln mit Abbaurichtung: im mechanisierten Strebbau stehen Verhiebrichtung und Abbaurichtung senkrecht zueinander

Walzenlader

der; auch Walzenschrämlader; Betriebsmittel zum Lösen und Laden von Wertmineral und Nebengestein; schneidende Gewinnung

*„Der Nachteil der Intelligenz besteht darin,
dass man ununterbrochen gezwungen ist, dazuzulernen.“*

George Bernard Shaw (1856-1950), irischer Dramatiker,
Schriftsteller und Nobelpreisträger

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad, Winkeleinheit
20mile	Twentymile, auch PaWeb-PaOpen, Schnittverfahren
A	Ampere, Stromstärkereinheit
AFC	Armored Face Conveyor, Kettenkratzerförderer im Streb
BGMR	Lehr- und Forschungsgebiet Betriebsmittel für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe an der RWTH Aachen
BGR	Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutsche Bundeseinrichtung
Bi-di	Bi-direktional, Schnittverfahren
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BP	British Petroleum, Energiekonzern
CM	Continuous Miner, Gewinnungsmaschine zum Lösen und Laden von mineralischen Rohstoffen
EIA	Energy Information Administration, US-Bundeseinrichtung
GJ	Gigajoule, Energieeinheit
gon	Gon, Winkeleinheit: 400 gon = 360 °
Gtoe	Giga tonnes oil equivalent, Energieeinheit: 1 toe = 41,868 GJ = 11,630 MWh
HG	head gate, Hauptantrieb im Streb
hp	horse power, Leistungseinheit, 0,745 kW
IEA	International Energy Agency, int. Agentur mit Sitz in Paris
IISI	International Iron and Steel Institute, int. Verband von Eisen und Stahlproduzenten
J	Joule, Energieeinheit
kN	Kilonewton, Krafteinheit
kW	Kilowatt, Leistungseinheit
kWh	Kilowattstunde, Energieeinheit
LTCC	Longwall Top Coal Caving, Abbaumethode für große Flözmächtigkeiten
LW	Longwall, engl. für Streb
m	Meter, Längeneinheit
m² oder qm	Quadratmeter, Flächeneinheit

Abkürzungsverzeichnis

m ³	Kubikmeter, Volumeneinheit
MAC-Adresse	Media Access Control-Adresse, individuelle Adresse einer Computer-Netzwerkkarte
min	Minute, Zeiteinheit
Mh	Mannstunde, Zeiteinheit und Bezugsgröße
Ma	Mannjahr, Zeiteinheit und Bezugsgröße
MSLM	Master-Slave Longwall Module, Algorithmus-Erweit. von ProSL
MWh	Megawattstunde, Energieeinheit
N	Newton, Krafteinheit
OOP	Objektorientierte Programmierung, Programmierungsstandard
PaOpen	Partial Opening, Teilöffnungsverfahren, Schnittverfahren
PaWeb	Partial Web, Teilschnitt- oder Teilrückverfahren, Schnittverfahren
PaWeb-PaOpen	Partial Web-Partial Open, Schnittverfahren
PEV	Primärenergieverbrauch
ProSL	Production Simulation of Shearer and Longwall Operations, Strebbausimulations- und Analysetool
RWTH	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule in Aachen
s	Sekunde, Zeiteinheit
sht	short tons, Masseneinheit, 0,907 t
SKE	Steinkohleeinheiten, Energieeinheit: 1 t SKE = 29,3076 GJ = 8,141 MWh = 0,7 toe (tonnes oil equivalent)
t	metrische Tonne, Masseneinheit
TG	tail gate, Hilfsantrieb im Streb
toe	tonnes oil equivalent, Energieeinheit: 0,7 toe = 1 t SKE
UML	Unified Modeling Language, Sprache zur Modellierung von Software
Uni-di	Uni-direktional, Schnittverfahren
USB	Universal Serial Bus, Datenschnittstellen-Standard
VBA	Visual Basic for Applications, Programmiersprache
W	Watt, Leistungseinheit
WEO	World Energy Outlook, Publikation der IEA
Wh	Wattstunde, Energieeinheit
WCI	World Coal Institute, Interessenvereinigung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung des PEV von 1971 bis 2005 nach Anteilen der Energieträger	6
Abbildung 1-2: Entwicklung und Prognose des PEV von 1950 bis 2030.....	6
Abbildung 1-3: Prognosen für 2030 der im Wachstum befindlichen Strommärkte in den Schwellen- und Entwicklungsländern	7
Abbildung 1-4: Globale Produktion von Stahl und Koks kohle zwischen 1981 und 2006	8
Abbildung 1-5: Globale Hartkohleförderung 2006 und ihre Hauptförderländer	9
Abbildung 1-6: Anteile nicht erneuerbarer Energien an den Energiereserven 2006	10
Abbildung 1-7: Länderanteile an den Hartkohlereserven 2006	11
Abbildung 1-8: Länderanteile an den Hartkohleressourcen 2006.....	11
Abbildung 1-9: Örterbau mit Bolter Miner	13
Abbildung 1-10: Strebbaubau mit Hobel und Walzenlader	14
Abbildung 1-11: Hauptförderländer von Hartkohle im Jahr 2006, Untertageanteile, Anteile mechanisierten Strebbaus.....	15
Abbildung 1-12: Hartkohleförderung 2006 nach Abbaumethode.....	16
Abbildung 1-13: Durchschnittliche Produktivität nach Abbaumethode in den USA 2007	18
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Bergwerks mit Strebbaubau; Foto vom Walzenladereinsatz im Streb.....	22
Abbildung 2-2: Zwei unterschiedliche Abbaufahrten von mächtigen Flözen	24
Abbildung 2-3: Walzenlader inkl. wichtigster Komponenten und Person zum Größenvergleich	26
Abbildung 2-4: Kettenkratzerförderer mit Mittelkette in einem Walzenstreb auf Sylvinite	28
Abbildung 2-5: Schilde im Testaufbau übertage und im Einsatz untertage.....	29
Abbildung 2-6: Draufsicht eines Schnittverfahrens mit Gewinnungsfahrten und Strebrandoperationen	30
Abbildung 2-7: Klassifizierung der Schnittverfahren mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (oben)	32
Abbildung 2-8: Prinzipskizze des Bi-direktionalen Schnittverfahrens mit Draufsicht (oben) und ausgewählten Schritten in Drauf- und Seitenansicht (links).....	34
Abbildung 2-9: Gespiegelte Bi-di Schleifenfahrt in der Draufsicht	35
Abbildung 2-10: Variation in der Tragarmstellung bei der Schleifenfahrt, Drauf- und Seitenansichten	35
Abbildung 2-11: Draufsicht mehrerer Räumfahrten und Richtungswechsel im Bereich der Antriebe	36
Abbildung 2-12: Prinzipskizze des Uni-direktionalen Schnittverfahrens in Drauf- und Seitenansichten	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-13: Variation des Uni-direktionalen Schnittverfahrens „backward snake“	38
Abbildung 2-14: Prinzipskizze in Draufsicht (oben) und Seitenansicht (links) des Teilschnittverfahrens mit variabler Schnitttiefe	40
Abbildung 2-15: Prinzipskizze in Draufsicht und Seitenansicht des Teilöffnungsverfahrens.....	42
Abbildung 2-16: Prinzipskizze in Draufsicht und Seitenansicht vom Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahren	43
Abbildung 2-17: Variation des Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahrens: Kaiser Cut	45
Abbildung 2-18: Variation des Teilschnitt- und Teilöffnungsverfahrens: Variable Web Uni- di Variant.....	45
Abbildung 2-19: Vergleich der Walzenlader-Schnittverfahren mit ausgesuchten Kriterien	47
Abbildung 3-1: Unterteilung eines Schnittverfahrens in diskrete Schritte, hier: Bi-di	51
Abbildung 3-2: Simulation der Bergfahrt bei Begrenzung durch Förderermotoren	57
Abbildung 3-3: Simulation der Talfahrt bei Begrenzung durch Förderermotoren	58
Abbildung 3-4: Einzubeziehende Faktoren bei der Berechnung der Jahresproduktion.....	61
Abbildung 3-5: Anordnung der Betriebsmittel im Bunker-Modul	62
Abbildung 3-6: Walzenlader- und Förderkapazitäten über die Zeit einer Bi-di Sequenz	66
Abbildung 3-7: Berechnung des Bunkerfüllstands für einen Zeitabschnitt.....	67
Abbildung 3-8: Anordnung von Master und Slave mit Zeitversatz in den Massenströmen	68
Abbildung 3-9: Stundenbezogene Kapazitäten der drei Schnittverfahren-Kombinationen	70
Abbildung 3-10: Verfügbarkeiten beider Strebbetriebe	71
Abbildung 3-11: Struktur und Datenfluss des Berechnungsalgorithmus.....	74
Abbildung 4-1: Gewinnungskapazitäten verschiedener Schnittverfahren und Maschinentypen bei ansteigender Streblänge	78
Abbildung 5-1: Vergleich automatisch aufgezeichneter mit manuell erfassten Daten	82
Abbildung 5-2: Errechnete Bewegungswiderstände im Obertrum in Abhängigkeit von der Walzenladerposition.....	88
Abbildung 5-3: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Förderzahlen	90
Abbildung 5-4: Vergleich tatsächlicher mit berechneter Walzenladerposition	90
Abbildung 6-1: Vor- und Nachteile dieser Strebbausimulation.....	94
Abbildung 0-1: Schematische Darstellung der UN-Rahmen-Vorratsklassifikation.....	127
Abbildung 0-2: Startseite der Eingabemasken „ProSL Main Page“	129
Abbildung 0-3: Maske „Geology properties“.....	129
Abbildung 0-4: Eingabemaske „Shearer loader“	130
Abbildung 0-5: Eingabemaske „AFC settings“	130
Abbildung 0-6: Eingabemaske „Downstream equipment“	131
Abbildung 0-7: Eingabemaske „Working time“	131
Abbildung 0-8: Eingabemaske „Sequence settings“	132
Abbildung 0-9: Markierung von unzulässigen Werten im Tabellenblatt	134
Abbildung 0-10: Fehlernachricht bei ungültigen Eingaben in der Eingabemaske.....	135
Abbildung 0-11: Auszug aus Check-Seite: Eingabe zulässiger Ober- und Untergrenzen.....	135
Abbildung 0-12: Kurve von Bunkerfüllstand über die Zeit.....	136
Abbildung 0-13: Datenflussdiagramm der Master-Slave Berechnung	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-14: Prognosen der Jahresförderung der drei Schnittverfahren-Kombinationen	140
Abbildung 0-15: Geschwindigkeitsprofil des Slave-Walzenladers im Bi-di Modus	141
Abbildung 0-16: Fahrbare Geschwindigkeitsprofile des Slave im Bi-di und PaWeb Schnittverfahren	141
Abbildung 0-17: Selektive Gewinnung von Kalisalz im Strebbau	143
Abbildung 0-18: Selektive Gewinnung von Kalisalz mittels Walzenladertechnik	144
Abbildung 0-19: Zeitpunkt der manuellen Überprüfung der automatisch aufgezeichneten Daten	146
Abbildung 0-20: 1.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	146
Abbildung 0-21: 2.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	147
Abbildung 0-22: 3.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	147
Abbildung 0-23: 4.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	147
Abbildung 0-24: 5.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	148
Abbildung 0-25: 6.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	148
Abbildung 0-26: 7.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt	148
Abbildung 0-27: Situationen am 1.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum	149
Abbildung 0-28: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition	149
Abbildung 0-29: Situationen am 2.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum	149
Abbildung 0-30: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition	150
Abbildung 0-31: Situationen am 3.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum	150
Abbildung 0-32: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition	150
Abbildung 0-33: Situationen am 4.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum	151
Abbildung 0-34: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition	151
Abbildung 0-35: Situationen am 5.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum	151
Abbildung 0-36: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition	152
Abbildung 0-37: Umrechnungskurven von Stromaufnahme in Wirkleistung	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parametersätze der verwendeten Walzenladertypen	77
Tabelle 2: Hartkohleförderung 2006, eigene Analyse der Untertage- und Strebbauanteile	128
Tabelle 3: Motorleistungsdaten des 1.250 hp Motors bei verschiedenen Betriebszuständen	153
Tabelle 4: Auf Nennbetriebspunkt normierte Daten	153

Literatur- und Quellenverzeichnis

AL_2007

Australian Longwall Magazine (03-2007): Production from Australian longwall mines for January 2006 - December 2006; Australian Longwall Magazine, Aspermont, Leederville / Australien

AL_2007-2

Australian Longwall Magazine (03-2007): Austar shining bright; Australian Longwall Magazine, Aspermont, Leederville / Australien

BAHR et al._2005

BAHR, A. ; RUTHERFORD, A. (06-2005): Cutting Edge; Australian Longwall Magazine, Aspermont, Leederville / Australien

BARTHEL_1999

BARTHEL, F. (10-1999): Commodity Top News No 6: Fakten, Analysen, Wirtschaftliche Hintergrundinformationen; BGR, Hannover / Deutschland

BAYER_2000

BAYER, A.K. (09-2000): Ein Kapazitätsplanungsmodell für die Continuous Miner Gewinnung; Diplomarbeit, RWTH Aachen, BGMR, Aachen / Deutschland

BAYER_2008

BAYER, A.K. (2008): Informatives Gespräch mit Kraftwerkssparte E.ON; nicht veröffentlicht

BGS_2008

BGS (2008): World Mineral Production 2002 - 2006; BGS, Nottingham / Großbritannien

BMWi_2008

BMWi (2008): Energiereserven; BMWi.de, Berlin / Deutschland

BUSSMANN_2001

BUSSMANN, H. (2001): Wirtschaftliche Gewinnung dünner Flöze - Vergleich verschiedener Produktionsmethoden und Ansätze zur Steigerung der Produktionskapazität für den Strebbau mit schneidender Gewinnung; Dissertation, RWTH Aachen, Aachen / Deutschland

- CI_2006
Coal International (09-2006): China Coal Market Restructures and Consolidates; Coal International, London / Großbritannien
- DW_2008
Deutsche Welle (08-2008): PKK will Anschlag auf Ölpipeline verübt haben; DW-world.de, Bonn / Deutschland
- EIA_2006
Annual Report (10-2006): Tonnage reported for Fiscal year 2006; Annual Report, EIA, Washington / USA
- EIA_2008
EIA (06-2008): Annual Energy Review 2007 - Coal; EIA, Washington / USA
- FREME_2007
FREME, F. (03-2007): U.S. Coal Supply and Demand 2006 Review; EIA, Washington / USA
- FREME_2007-2
FREME, F. (11-2007): Annual Coal Report 2006; EIA, Washington / USA
- GRUMBRECHT_1949
GRUMBRECHT, A. (1949): Einführung in den Bergbau; VGE, Essen / Deutschland
- HACKELBÖRGER et al._2007
HACKELBÖRGER, B.; HÖLLING, B ; NIENHAUS, K. ; WINKEL, R. (09-2007): Automatisierung der Walzenladertechnik - ein Überblick; Fachzeitschrift Glückauf, VGE, Essen / Deutschland
- HARTMAN et al._1996
HARTMAN, H. L.; PENG, S. S.; CHIANG, H. S. (1996): SME Mining Engineering Handbook - 2nd Edition, Vol.1; SME, Littleton / USA
- HRL_2006
Hillsborough Resources Ltd (01-2006): Annual Report; HRL, Vancouver / Kanada
- IEA_2006
International Energy Agency (01-2006): World Energy Outlook 2006 - Zusammenfassung & Schlussfolgerung; IEA, Paris / Frankreich
- IM_2007
International Mining (09-2007): Ultra-long face conveying - As longwalls get longer AFC challenges increase; International Mining, Berkhamsted / Großbritannien
- JORC_2004
JORC (2004): The JORC Code - The 2004 Australasian Code for Reporting Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves; JORC, Victoria / Australien

KACI et al._1997

KACI, V.; PLUM, D. (1997): Hochleistungsförderer in langen Streben - Auslegung, Antriebstechnik und Betrieb; Kolloquium High Performance Longwall Extraction, RWTH Aachen BBK1, Aachen / Deutschland

KEMPKA et al._2008

KEMPKA, T.; SCHLÜTER, R.; KUNZ, E.; GOLZ, N.; FERNANDEZ-STEEGER, T.M. (04-2008): An economic and sustainable Approach for future Energy Generation?; Geophysical Research Abstracts, General Assembly of the European Geosciences Union 2008 , EGU, Wien / Österreich

KEUTEN et al._2008

KEUTEN, F.; HINKENS, O. (05-2008): Entwicklung eines Umrechnungsalgorithmus für metrische und US-Eingabewerte in VBA für Excel-Programme, unveröffentlicht, RWTH Aachen, BGMR, Aachen / Deutschland

KIRIJENKO et al._2002

KIRIJENKO, W. M.; TSCHUSHOW, W. N. (2002): Vorbereitung und Abbau von Kaliflözen mit selektiver Gewinnung in Belarus; AIMS - Rapid Mine Development, VGE, Aachen / Deutschland

KUNDEL et al._1983

KUNDEL, H.; DÜRRER, F.; STREIZ, H.; WENZEL, W. (1983): Kohलगewinnung - 6.Auflage; Glückauf Betriebsbücher, VGE, Essen / Deutschland

LANGE_2007

LANGE, U. (2007): Schachtanlagen 1-4, Fa. Belaruskali; unveröffentlichter Befahrungsbericht, RWTH Aachen, BGMR, Aachen / Deutschland

LANGE_2007-2

LANGE, U. (2007): Beltana Mine; unveröffentlichter Befahrungsbericht, RWTH Aachen, BGMR, Aachen / Deutschland

LANGE_2007-3

LANGE, U. (2007): Grasstree Mine; unveröffentlichter Befahrungsbericht, RWTH Aachen, BGMR, Aachen / Deutschland

LESCHHORN_2007

LESCHHORN, F. (05-2007): Technische und soziale Zukunftsaspekte des australischen Steinkohlenbergbaus; Fachzeitschrift Glückauf, VGE, Essen / Deutschland

LINGEN_1979

LINGEN, H. (1979): Lingen Lexikon; Lingen Verlag, Köln / Deutschland

METHA et al._2003

METHA, S.R.; DASGUPTA, S. (08-2003): Why Longwall in India has not Succeeded as in other Developing Country Like China; Divisional Journal Mining Engineering, The Institution of Engineers (India), Kolkata / Indien

MJ_2005

The Mining Journal (12-2005): Mining Annual Review - Coal; MJ, London / Großbritannien

MMCS_2006

MMCS (01-2006): CMM Global Overview - Ukraine - Summary of Coal Industry; Methane to Markets Partnership Coal Subcommittee, Washington / USA

MOC_2008

MOC (01-2008): Annual Report 2006 - 2007; Government of India - Ministry of Coal, New Delhi / Indien

MSHA_2006

MSHA (2006): 2006 Fatalgrams and Fatal Investigation Reports - Coal Mines; MSHA, Arlington / USA

MUKHERJEE_2003

MUKHERJEE, S.N. (08-2003): Mechanised Longwall Mining in India - a Status Review; Divisional Journal Mining Engineering, The Institution of Engineers (India), Kolkata / Indien

NIEHÖRSTER_2005

NIEHÖRSTER, K. (05-2005): Hoher Ölpreis belebt Kohlehydrierung; VDI-nachrichten.com, VDI, Düsseldorf / Deutschland

NIENHAUS et al._2002

NIENHAUS, K.; BAYER, A.K.; RADDATZ, H.; LAUTSCH, T. (05-2002): Optimization of Multi-Entry Development Systems; AIMS - Rapid Mine Development, RWTH Aachen, BBK1, VGE, Essen / Deutschland

NIENHAUS et al._2003

NIENHAUS, K.; BAYER, A.K.; HAUT, H. (2003): High Productivity - A question of shearer loader cutting sequences?; AIMS - High Performance Mine Production, RWTH Aachen, BBK1, VGE, Essen / Deutschland

PENG_2006

PENG, S. S. (10-2006): Longwall Mining - 2nd Edition; West Virginia University, Morgantown / USA

REMPEL et al._2007

REMPEL, H.; SCHMIDT, S., SCHWARZ-SCHAMPERA, U. (11-2007): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2006 - Kurzstudie; BGR, Hannover / Deutschland

REUTERS_2008

REUTERS (07-2008): Nigerianische Rebellen - Anschläge auf zwei Rohöl-Pipelines; de.reuters.com, Frankfurt / Deutschland

REUTHER et al._1989

REUTHER, E.-U.; HEISE, F.; HERBST, F.; FRITZSCHE, H.C. (1989): Lehrbuch der Bergbaukunde - 11.Auflage; VGE, Essen / Deutschland

RIESER et al._2007

RIESER, K.H.; NIENHAUS, K.; WINKEL, R (11-2007): Volksrepublik China - Schrittmacher im Bergbaumaschinengeschäft; Fachzeitschrift Glückauf, VGE, Essen / Deutschland

RITSCHHEL et al._2007

RITSCHHEL,W.; SCHIFFER, H.W. (10-2007): World Market for Hard Coal - 2007 Edition; RWE, Essen / Deutschland

RMG_2007

RMG (2007): Raw Materials Data BASE; Datenbank, Raw Materials Group, Stockholm / Schweden

RUTHERFORD et al._2007

RUTHERFORD, A.; RINGLEFF, H. (09-2007): Australia's first LTCC face operation; AIMS - High Performance Mine Production, RWTH Aachen, BBK1, VGE, Essen / Deutschland

RUTHERFORD_2006

RUTHERFORD, A. (2006): Ashton Bi-di cutting cycle; unveröffentlichte Schemazeichnung des Schnittverfahrens, Eickhoff Bergbautechnik GmbH, Bochum / Deutschland

RUTHERFORD_2008

RUTHERFORD, A. (2008): Informatives Gespräch mit Longwall Consultant; Andrew Rutherford Pty Ltd, nicht veröffentlicht, Australien

SCHMITT_2008

SCHMITT, S. (01-2008): Die Rolle Chinas auf dem Weltsteinkohlenmarkt; Commodity Top News, BGR, Hannover / Deutschland

STONE_2006

STONE, K. (01-2006): Coal - Canadian Developments; Canadian Minerals Yearbook, Natural Resources Canada, Ottawa / Kanada

VOGELWEDDE_2008

VOGELWEDDE, T.R. (2008): Informatives Gespräch mit BGMR-Kapazitätsplanungsgruppe; nicht veröffentlicht

WÄLTERLIN_2008

WÄLTERLIN, U. (01-2008): Transportstau in Australien; Handelsblatt, GWP, Düsseldorf / Deutschland

WCI_2005

World Coal Institute (05-2005): The Coal Resource - A Comprehensive Overview of Coal; WCI, London / Großbritannien

WCI_2006

World Coal Institute (09-2006): Coal Facts - 2006 Edition; WCI, London / Großbritannien

WCI_2007

World Coal Institute (08-2007): Coal & Steel; WCI, London / Großbritannien

WEDIG_2007

WEDIG, M. (05-2007): Thick seam underground mining methods; Coal International, London / Großbritannien

WRIGHT_2008

WRIGHT, A. (2008): Informatives Gespräch mit Chief Executive Officer The Coal Association; nicht veröffentlicht

XIE et al._2006

XIE, Y. ; ZHAO, Y. ; DAI, J. ; SONG, X. (11-2006): Technique of Top-Coal Caving Method with Vibration and its Application; Coal International, London / Großbritannien

Anhang

- A1 Definitionen: Reserve, Ressource und Lebensdauer**
- A2 Hartkohleförderung 2006**
- A3 Eingabemasken des Programms**
- A4 Aufbau und Funktionsweise des Plausibilitätschecks**
- A5 Beispielszenario Bunkersimulation**
- A6 Aufbau und Datenfluss des MSLM**
- A7 Beispielszenario zweier Strebbetriebe**
- A8 Berechnung des Mitschnitts in der selektiven Gewinnung von Kalisalz**
- A9 Kurven von Messdaten für die Kalibrierung und Verifizierung**
- A10 Kenndaten eines 1.250 hp Motors**

A1 Definitionen: Reserve, Ressource und Lebensdauer

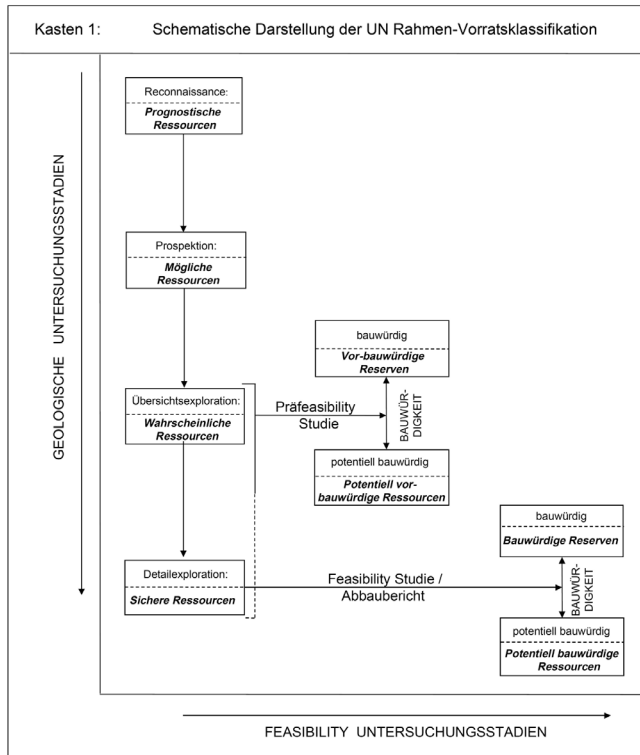
International gibt es verschiedene Definitionen der o. g. Begriffe. Einen internationalen Standard setzt der JORC-Code (The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia). Es handelt sich um eine Einigung auf Regeln bei der Darstellung von Explorationsergebnissen und Rohstoffvorkommen [JORC_2004].

Die hier zusammengefasste Definition inklusive der Grafik (Abbildung 0-1) ist einer Informationsbroschüre „Commodity Top News: Fakten, Analysen, Wirtschaftliche Hintergrundinformationen Nr. 6“ der BGR aus dem Jahr 1999 mit dem Titel „Reserven, Ressourcen und Lebensdauer von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen“ entnommen [BARTHEL_1999].

Bevor eine Lagerstätte abgebaut werden kann, erfolgt eine mehrere Jahre andauernde Untersuchung des Vorkommens in aufeinander folgenden Schritten mit zunehmendem Aufwand und Kosten und einhergehendem steigendem Detaillierungsgrad der Informationen. Nach jedem Schritt ist zu entscheiden, ob die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen viel versprechend sind und somit das Fortführen der Untersuchungen rechtfertigen. Am Ende steht die Machbarkeitsstudie (Feasibility Study), in der der Erlös aus der Menge an gewinnbarem Rohstoff den Kosten für die Gewinnung gegenübersteht. Fällt die Machbarkeitsstudie positiv aus, wird das Vorkommen von mineralischen Rohstoffen als bauwürdige Reserve bezeichnet, d.h. „die mineralische Rohstoffmenge einer Lagerstätte ist technisch und wirtschaftlich unter den derzeit gegebenen Marktbedingungen gewinnbar“.

Einen Einfluss auf den Status Reserve haben deshalb u. a. der Stand der Gewinnungstechnik, die mit der Gewinnung verbundenen Kosten und die auf dem Markt zu erzielenden Preise des betrachteten Rohstoffs. Wenn nicht der notwendige Preis für den Rohstoff auf dem Markt zu erzielen ist, die Lagerstätte aber als technisch gewinnbar bewertet wurde, wird sie als potentiell bauwürdige Ressource bezeichnet. Ist nur die

Menge des Rohstoffs bekannt, aber Untersuchungen über die technische Machbarkeit stehen noch aus, dann ist es eine sichere Ressource. Mit abnehmender Dichte der Informationen über ein Vorkommen spricht man von wahrscheinlicher, möglicher oder prognostischer Ressource.



Quelle: BGR, Fakten, Analysen, Wirtschaftliche Hintergrundinformationen Nr. 6, 1999

Abbildung 0-1: Schematische Darstellung der UN-Rahmen-Vorratsklassifikation

Wird ein Rohstoff abgebaut, ist die Frage von Bedeutung, wie lange der Abbau noch fortgeführt werden kann. Der Begriff der statischen Lebensdauer oder Reichweite eines Rohstoffs beschreibt das Verhältnis von Ressourcenmenge zur Fördermenge. Sie ist eine theoretische, momentane Erhebung, wie lange ein Abbau mit gleichbleibender Fördermenge pro Jahr alleine aus Sicht der Massenbilanz durchgeführt werden kann. Aufgrund von Änderungen in der Förder- und in der Reservenmenge werden die Werte mit Korrekturfaktoren zu versehen, so dass dann eine dynamische Lebensdauer des Rohstoffs errechnet wird.

A2 Hartkohleförderung 2006

Tabelle 2: Hartkohleförderung 2006, eigene Analyse der Untertage- und Strebbauanteile

Nr.	Land	Hartkohleförderung in 2006 und Anteile an Weltförderung		Kumulierte Anteile		Untertageförderung und Anteile an Hartkohleförderung		Förderung aus Bergwerken mit mech. Strebbau und Anteile an Untertageförderung...		...und Anteil an ges. Hartkohleförderung		Quellen	Kommentar
		[Mio. t]	[%]	[%]	[%]	[Mio. t]	[%]	[Mio. t]	[%]	[%]	[%]		
1	China	2.381,0	44,5	44,5	2262,0	95,0	2262,0	635,0	28,1	26,7		REMPPEL_2007; IEA_2006; CI_2006	Anteile aus mech. Streben nach CI_2006 aus 2005; Hochleistungsstriebe mit 17.543 t/Ma
2	USA	999,0	18,7	63,1	308,3	30,9	180,5	180,5	59,5	18,1		REMPPEL_2007; REMPEL_2007; NIMA_2008; EIA_2006	
3	Indien	398,0	7,4	70,5	76,9	19,1	4,1	4,1	5,4	1,0		REMPPEL_2007; MOC_2008; METHA_2003; MUKHERJEE_2003	Angaben über Anteil Strebbau nach Metha_2003 und Mukherjee_2003
4	Australien	305,0	5,7	76,2	66,9	21,9	61,9	61,9	92,5	20,3		REMPPEL_2007; WCI_2005; AL_2007; Leschhorn_2007; RITSCHHEL_2007	Schwankende Angaben zur Untertageproduktion: 61-75 Mio. t
5	Südafrika	246,4	4,6	80,8	125,7	51,0	24,1	24,1	19,2	9,8		DME_2008; RITSCHHEL_2007	Strebbauanteil geschätzt nach RITSCHHEL_2007
6	Russland	232,7	4,3	85,2	109,0	46,8	92,7	85,0	85,0	39,8		RITSCHHEL_2007; RMG_2007	
7	Indonesien	200,0	3,7	88,9	0,6	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0		RITSCHHEL_2007; BGS_2008; RMG_2007	
8	Polen	96,0	1,8	90,7	96,0	100,0	96,0	96,0	100,0	100,0		RITSCHHEL_2007	
9	Kasachstan	93,0	1,7	92,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		BAYER_2008	
10	Ukraine	79,7	1,5	93,9	71,3	89,5	26,9	26,9	37,7	33,8		RMG_2007; BAYER_2008; IMCS_2006	Strebbauanteil geschätzt nach RMG_2007 und IMCS_2006
11	Kolumbien	64,0	1,2	95,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		RMG_2007; RITSCHHEL_2007	
12	Kanada	58,0	1,1	96,2	1,5	2,5	0,5	0,5	31,4	0,8		STONE_2006; HRL_2006; WRIGHT_2008	
13	Rest	203,0	3,8	100,0	122,0	60,1	85,4	85,4	70,0	42,1		REMPPEL_2007	Untertage- und Strebbauanteil geschätzt nach REMPEL_2007
	Summe	5.356	100,0		3.239	60,5	1.207	37,3		22,5			

Zahlen gerundet
Zahlen basieren teilweise auf länderspezifischen Kohlenklassifizierungssystemen

A3 Eingabemasken des Programms

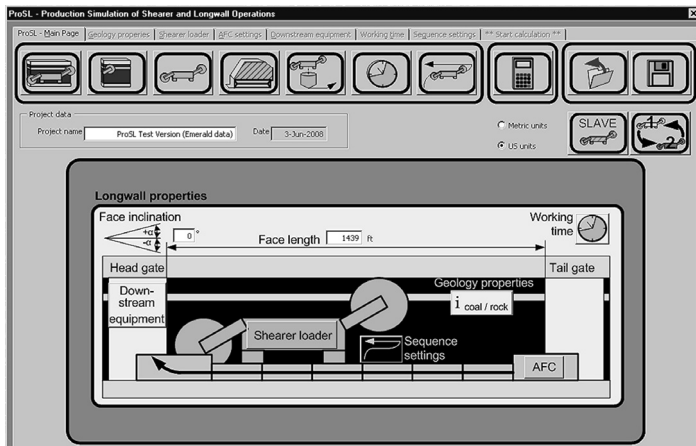


Abbildung 0-2: Startseite der Eingabemasken „ProSL Main Page“

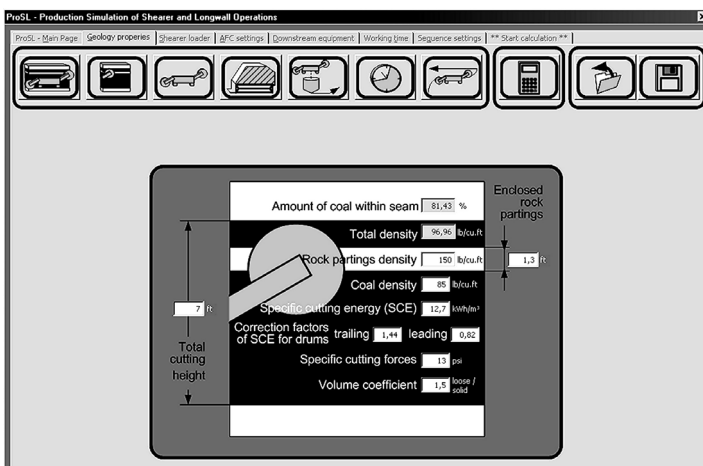


Abbildung 0-3: Maske „Geology properties“

ProSL - Production Simulation of Shearer and Longwall Operations

ProSL Main Page | Geology properties | Shearer loader | AFC settings | Downstream equipment | Working time | Sequence settings | ** Calculation results **

Operational settings

Manual cutting speed limitation HG → TG 30 ft./min
 Manual cutting speed limitation TG → HG 30 ft./min
 Max face end operation speed 30 ft./min (If no restriction set 0)

Shearer type 7LSJA

Full web 41 in
 Drum diameter 64 in
 Max. possible speed 75.01 ft./min
 Face end hold time (raising/lowering ranging arms, swivelling crows) 1.5 min

Full load cutting power 710 hp
 Cutter drive efficiency 0.93
 Haulage efficiency 0.95
 Haulage motor power (2 Mot.) 214 hp
 Machine weight 68 shk
 Clearance cross section 3.05 sq.ft.

Machine length 40 ft

Gear box

Auto. transm. ratio calc. ☐
 User def. transm. Ratio (ix) 232.5
 Auto. calc. transm. Ratio ☐
 Incr. of cut. force (safe.fac.) % ☐
 Rotation { Min. 1800 rpm
 Max. 3600 rpm

Number of teeth Z1 11 Z2 23 Z3 31 Z4 10
 Gear Z1 (i)
 Z2 (i)
 Z3 (i)
 Z4 (i)
 Rack

Max haulage pull 89.68 shk.
 at speed 37.5 ft./min
 Pitch circle diameter of gear wheel Z4 18.5 m
 Modulus of gear wheel Z4 1.05 mm

PRO SL

Abbildung 0-4: Eingabemaske „Shearer loader“

ProSL - Production Simulation of Shearer and Longwall Operations

ProSL Main Page | Geology properties | Shearer loader | AFC settings | Downstream equipment | Working time | Sequence settings | ** Calculation results **

AFC chain

Specific chain weight 111.05 lb./ft.
 Breaking force 696.88 shk
 Current safety level 1.52
 Flight bar pitch 6 pitch
 User def. chain type 48
 Number of chains 2

Automatically choosing best chain ☐
 User defined safety level ☐
 Chosen chain type ☐

AFC cross section

Max. AFC load cross section 6.14 sq.ft.
 Friction factors 0.45
 AFC width 1132

AFC snaking

snake length 46 ft
 machine length
 AFC snaking resistance factor (norm. included in friction factors) 1

Head Gate Drive

AFC motor power at HG (2 Mot.) 3300 hp
 Breakdown torque factor 2.4
 AFC speed 370 ft./min
 Drive efficiency 0.9

Tail Gate Drive

AFC motor power at TG 1450 hp

Abbildung 0-5: Eingabemaske „AFC settings“

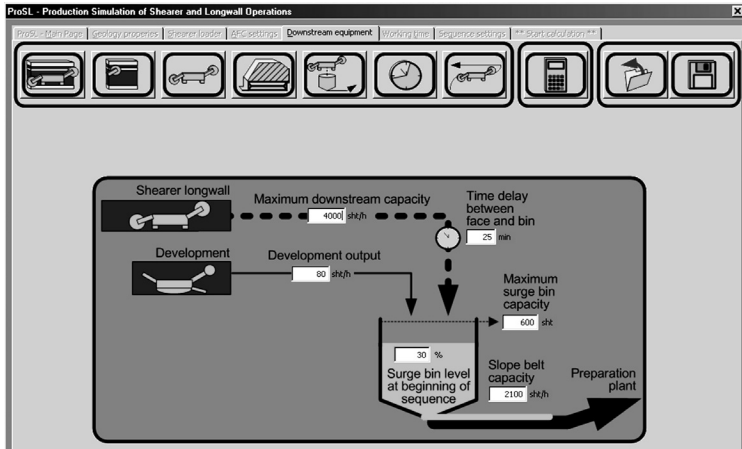


Abbildung 0-6: Eingabemaske „Downstream equipment“

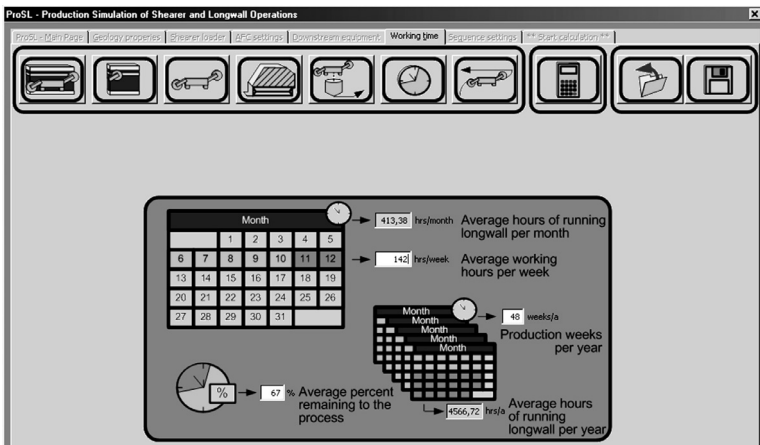


Abbildung 0-7: Eingabemaske „Working time“

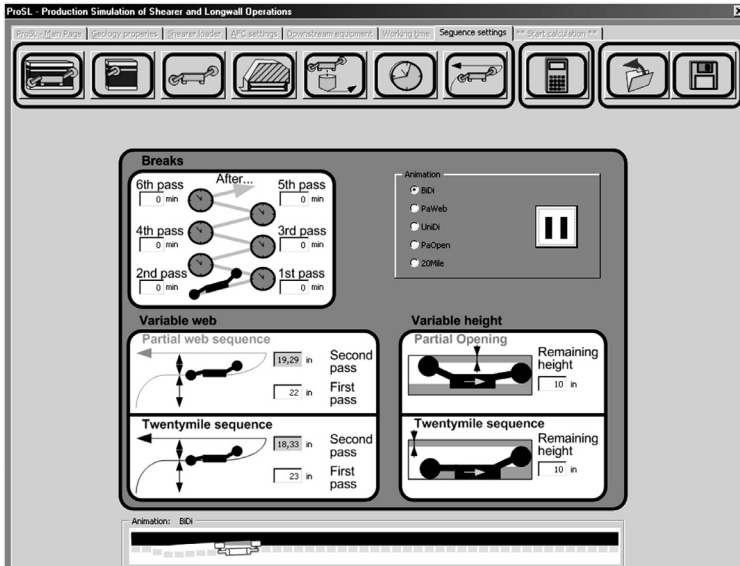


Abbildung 0-8: Eingabemaske „Sequence settings“

A4 Aufbau und Funktionsweise des

Plausibilitätschecks

Obwohl die Eingabe von Werten über die Darstellung in Eingabemasken übersichtlich vorbereitet ist, stellt die Arbeit mit dem Berechnungsalgorithmus eine komplexe Aufgabe dar. Um die Bedienung komfortabler und sicherer gegen Fehleingaben zu gestalten, besitzt der Algorithmus eine Plausibilitätsprüfung, der die Eingabewerte auf Plausibilität überprüft und ggf. bei einem auftretenden Fehler den Bediener darauf aufmerksam macht und zur Korrektur auffordert.

Eine unzulässige Eingabe kann ein ungültiges Zeichen sein wie z. B. Buchstaben anstatt Ziffern oder ein nicht schlüssiger Wert wie z. B. eine negative Motorleistung. Auch könnte eine Eingabe innerhalb eines gültigen Bereichs liegen, aber in Verbindung mit einer anderen Angabe nicht zutreffen sein wie z. B. die gesamte Schneidhöhe, die nicht kleiner als ein Walzendurchmesser sein kann.

Die Plausibilitätsprüfung findet auf einem eigenen Excel-Blatt statt. Die Check-Seite ist mit der Eingabetabelle so verknüpft, dass die Eingabewerte auf der Check-Seite erscheinen und dort einer Prüfung unterzogen werden. Jeder Eingabewert durchläuft zwei Überprüfungen:

- Liegt der Eingabewert innerhalb der vom Benutzer/Administrator festgelegten Gültigkeitsgrenzen?
- Steht die Eingabegröße in einem unzulässigen Verhältnis mit anderen Werten?

Wenn kein Fehler auftritt, ist die Check-Seite ausgeblendet und nicht zugänglich für den Benutzer. Sobald fehlerhaft eingegeben wird, färbt sich das Eingabefeld rot ein (Abbildung 0-9) und die Check-Seite wird in der Leiste der verfügbaren Tabellenblätter sichtbar. Gleichzeitig werden andere Felder markiert, die mit dem Eingabefeld in einem Zusammenhang stehen.

Long	Long Properties	Long loader
4	Face length (only coal)	75.52 m
5	Total cutting height	75.52 m
6	Peak cutting power (100%)	750 hp
7	Peak cutting power (100%)	750 hp
8	Peak cutting power (100%)	750 hp
9	Peak cutting power (100%)	750 hp
10	Peak cutting power (100%)	750 hp
11	Peak cutting power (100%)	750 hp
12	Peak cutting power (100%)	750 hp
13	Peak cutting power (100%)	750 hp
14	Peak cutting power (100%)	750 hp
15	Peak cutting power (100%)	750 hp
16	Peak cutting power (100%)	750 hp
17	Peak cutting power (100%)	750 hp
18	Peak cutting power (100%)	750 hp
19	Peak cutting power (100%)	750 hp
20	Peak cutting power (100%)	750 hp
21	Peak cutting power (100%)	750 hp
22	Peak cutting power (100%)	750 hp
23	Peak cutting power (100%)	750 hp
24	Peak cutting power (100%)	750 hp
25	Peak cutting power (100%)	750 hp
26	Peak cutting power (100%)	750 hp
27	Peak cutting power (100%)	750 hp
28	Peak cutting power (100%)	750 hp
29	Peak cutting power (100%)	750 hp
30	Peak cutting power (100%)	750 hp
31	Peak cutting power (100%)	750 hp
32	Peak cutting power (100%)	750 hp
33	Peak cutting power (100%)	750 hp
34	Peak cutting power (100%)	750 hp
35	Peak cutting power (100%)	750 hp
36	Peak cutting power (100%)	750 hp
37	Peak cutting power (100%)	750 hp
38	Peak cutting power (100%)	750 hp
39	Peak cutting power (100%)	750 hp
40	Peak cutting power (100%)	750 hp
41	Peak cutting power (100%)	750 hp
42	Peak cutting power (100%)	750 hp
43	Peak cutting power (100%)	750 hp
44	Peak cutting power (100%)	750 hp
45	Peak cutting power (100%)	750 hp
46	Peak cutting power (100%)	750 hp
47	Peak cutting power (100%)	750 hp
48	Peak cutting power (100%)	750 hp
49	Peak cutting power (100%)	750 hp
50	Peak cutting power (100%)	750 hp
51	Peak cutting power (100%)	750 hp
52	Peak cutting power (100%)	750 hp
53	Peak cutting power (100%)	750 hp
54	Peak cutting power (100%)	750 hp
55	Peak cutting power (100%)	750 hp
56	Peak cutting power (100%)	750 hp
57	Peak cutting power (100%)	750 hp
58	Peak cutting power (100%)	750 hp
59	Peak cutting power (100%)	750 hp
60	Peak cutting power (100%)	750 hp
61	Peak cutting power (100%)	750 hp
62	Peak cutting power (100%)	750 hp
63	Peak cutting power (100%)	750 hp
64	Peak cutting power (100%)	750 hp
65	Peak cutting power (100%)	750 hp
66	Peak cutting power (100%)	750 hp
67	Peak cutting power (100%)	750 hp
68	Peak cutting power (100%)	750 hp
69	Peak cutting power (100%)	750 hp
70	Peak cutting power (100%)	750 hp
71	Peak cutting power (100%)	750 hp
72	Peak cutting power (100%)	750 hp
73	Peak cutting power (100%)	750 hp
74	Peak cutting power (100%)	750 hp
75	Peak cutting power (100%)	750 hp
76	Peak cutting power (100%)	750 hp
77	Peak cutting power (100%)	750 hp
78	Peak cutting power (100%)	750 hp
79	Peak cutting power (100%)	750 hp
80	Peak cutting power (100%)	750 hp
81	Peak cutting power (100%)	750 hp
82	Peak cutting power (100%)	750 hp
83	Peak cutting power (100%)	750 hp
84	Peak cutting power (100%)	750 hp
85	Peak cutting power (100%)	750 hp
86	Peak cutting power (100%)	750 hp
87	Peak cutting power (100%)	750 hp
88	Peak cutting power (100%)	750 hp
89	Peak cutting power (100%)	750 hp
90	Peak cutting power (100%)	750 hp
91	Peak cutting power (100%)	750 hp
92	Peak cutting power (100%)	750 hp
93	Peak cutting power (100%)	750 hp
94	Peak cutting power (100%)	750 hp
95	Peak cutting power (100%)	750 hp
96	Peak cutting power (100%)	750 hp
97	Peak cutting power (100%)	750 hp
98	Peak cutting power (100%)	750 hp
99	Peak cutting power (100%)	750 hp
100	Peak cutting power (100%)	750 hp

Abbildung 0-9: Markierung von unzulässigen Werten im Tabellenblatt

In dem hier dargestellten Beispiel ist die Eingabe einer geschnittenen Mächtigkeit von minus 0,3 m als unzulässig erkannt worden, weil sie einerseits negativ ist und somit nicht in die definierten zulässigen Grenzen passt und weil unter anderem ihre Interaktion mit dem Walzendurchmesser und dem Nebengesteinsmitschnitt Fehler verursacht.

- Die geschnittene Mächtigkeit kann nicht kleiner als der Walzendurchmesser sein.
- Die geschnittene Höhe kann nicht kleiner als die Mächtigkeit des Nebengesteinsmitschnitts sein.

Unter Verwendung der Eingabemasken öffnet sich bei auftretendem Fehler ein Fenster mit Hinweisen weshalb der eingegebene Wert nicht korrekt ist (Abbildung 0-10).

Die Interaktion mit anderen Eingabewerten ist fest in der Plausibilitätsüberprüfung verankert. Jedoch können die zulässigen Ober- und Untergrenzen für die Eingabewerte von den Benutzern selbst festgelegt und somit an die betriebseigenen Bedürfnisse oder technischen Weiterentwicklungen angepasst werden.

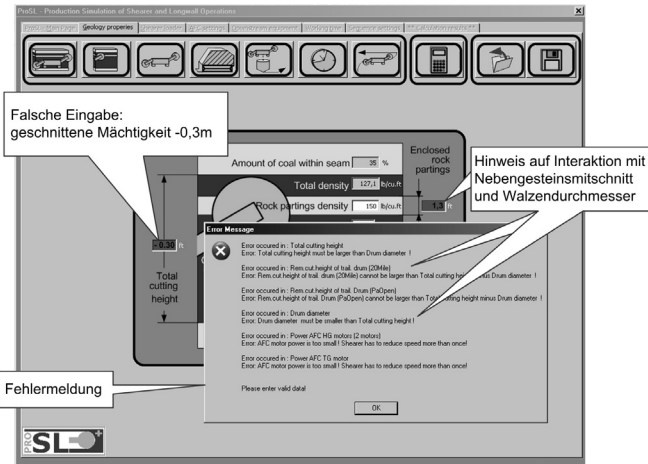


Abbildung 0-10: Fehlernachricht bei ungültigen Eingaben in der Eingabemaske

Dazu muss der Bediener bewusst einen Fehler verursachen, damit die Check-Seite eingeblendet wird. Auf ihr findet er alle Eingabewerte aufgelistet vor. Neben jedem Eingabewert befinden sich weiße Eingabefelder mit den zulässigen Ober- und Untergrenzen in metrischen und US-Einheiten für den jeweiligen Wert. Wie bei der Eingabetabelle ist die Eingabe in beiden Einheits-Systemen zulässig; das Feld mit der jeweils anderen Einheit wird automatisch aktualisiert.

D		E		F		H		J	
Name MASTER		Value (metric)	Value (US)	Max value (metric)	Max value (US)	Min value (metric)	Min value (US)		
1									
2	Longwall & Geology Properties								
3	Face length (only coal)	441.96	1450	502.92 m	1650.00 ft	180.00 m	590.54 ft		
4	Total cutting height	0.3048	1	6.10 m	20.00 ft	1.37 m	4.50 ft		
5	Rock partings	0.29824	1.3	1.00 m	3.28 ft	0.00 m	0.00 ft		

Abbildung 0-11: Auszug aus Check-Seite: Eingabe zulässiger Ober- und Untergrenzen

A5 Beispielszenario Bunkersimulation

Die Kurve in Abbildung 0-12 gibt den maximal zulässigen Bunkerfüllstand mit 500 sht (454 t) an. Zusätzlich stellt er die kumulierten Massen vom Streb kommend und den konstanten Bunkerabzug sowie die Massen aus dem Streckenvortrieb dar. In diesem Beispiel ist wegen der besseren Verständlichkeit die Zeit, die die Förderung vom Hauptantrieb bis zum Bunkereingang benötigt, auf Null gesetzt worden. Aus diesem Grund liegt die Kurve der kumulierten Strebförderung passend zu den Verfahrensschritten über der Kurve des Bunkerfüllstands.

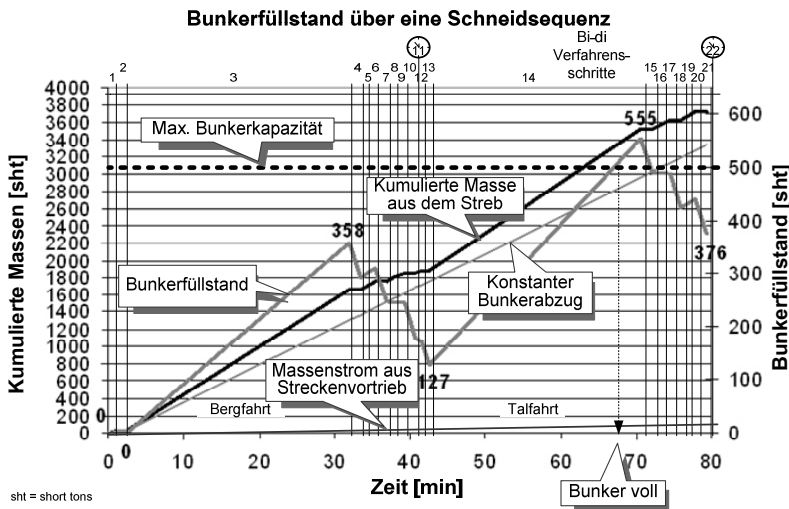


Abbildung 0-12: Kurve von Bunkerfüllstand über die Zeit

Insgesamt zeigt die Graphik, dass pro Schneidsequenz von etwa einer Stunde und 20 Minuten der Bunkerfüllstand um ca. 376 sht (341 t) oder 75 % des maximalen Bunkervolumens zunehmen würde, wenn er nicht schon vorher voll liefe. Ein leerer Bunker zu Beginn ist nach ca. 67 min voll, was zwangsweise zu einem Stillstand der Förderung und damit zu einem Stillstand des Strebs führen müsste. Der Bunker ist zu klein für

den Streb, da er nicht einmal die Gesamtmasse einer Schneidsequenz aufnehmen kann.

Als Lösung käme entweder eine Einschränkung der Gewinnungskapazität durch Reduzierung der Marschgeschwindigkeit des Walzenladers in Frage, oder der Streb muss bei anfangs leerem Bunker spätestens nach ca. 67 min eine Pause einlegen. Die Länge der Pause wird durch die zusätzlichen ca. 55 sht (50 t) beeinflusst, die noch aus dem Streb kommen, bis der Walzenlader den Strebrand erreicht, und es ist zu berücksichtigen, dass der Bunkerfüllstand mit Beginn der zweiten Sequenz wieder leer sein muss, damit die nächste Pause wieder nach ca. 67 min erfolgen kann. Ist aber der Bunker bei Beginn der nächsten Sequenz nicht leer, läuft er schneller voll und eine Pause wird eher nötig.



Das MSLM (Abbildung 0-13) benötigt eine manuelle Eingabe des Zeitversatzes (Abbildung 0-13, Nr. 1) zwischen den Massenströmen des Masters und des Slaves. Damit ist der zeitliche Unterschied zwischen dem Beginn des Master- und des Slave-Massenstroms gemeint, der beide Massenströme auf dem gemeinsamen Band gegeneinander verschiebt. Zusätzlich ist die Gesamtkapazität des gemeinsam genutzten Bands vom Benutzer einzugeben (Abbildung 0-13, Nr. 2).

Wie in dem allgemeinen Algorithmus arbeitet auch diese Berechnung mit einer Zeitleiste für den Massenstrom. Sie beginnt gemeinsam mit dem Zeitpunkt (Abbildung 0-13, Nr. 3), an dem der Slave-Massenstrom auf den des Masters trifft (Abbildung 3-8). Der Algorithmus sucht sich aus dem Master-Modell (Abbildung 0-13, Nr. 4) den zu dem Zeitpunkt relevanten Master-Verfahrensschritt heraus und errechnet anhand der Gewinnungskapazität des Masters und der Transportkapazität der Bandstraße die auf dem Band noch verfügbare Restkapazität, woraus sich die maximal zulässige Slave-Walzenlader-Geschwindigkeit ergibt (Abbildung 0-13, Nr. 5).

Die berechnete Geschwindigkeit aufgrund der Restkapazität wird mit den möglichen Marschgeschwindigkeiten verglichen (Abbildung 0-13, Nr. 6), die aufgrund strebeigener Restriktionen (siehe Kapitel 3.1) zustande kommen. Die resultierende maximal mögliche Marschgeschwindigkeit bestimmt die Dauer für den anstehenden Verfahrensschritt (Abbildung 0-13, Nr. 7). Der Algorithmus vergleicht nun die benötigte Zeit für den Master-Verfahrensschritt mit der des Slave-Verfahrensschritts (Abbildung 0-13, Nr. 8). Der Schritt, der abgeschlossen ist, setzt die nächste Zeitmarke (Abbildung 0-13, Nr. 9) auf der gemeinsamen Zeitleiste. Die Master- und die Slave-Kapazität bilden addiert die Gesamtkapazität (Abbildung 0-13, Nr. 10), die der gerade ermittelten Zeitmarke zugeordnet wird (Abbildung 0-13, Nr. 11).

Anhand der anstehenden Zeitmarke ermittelt der Algorithmus den aktuellen Verfahrensschritt im Master-Modell (Abbildung 0-13, Nr. 4) zusammen mit dessen Dauer. Beim Slave-Walzenlader bestimmt der Algorithmus die aktuelle Position (Abbildung 0-13, Nr. 13) und die verbleibende Zeit bis zum nächsten Schritt (Abbildung 0-13, Nr. 14) unter Berücksichtigung einer neuen möglichen Marschgeschwindigkeit. Dieser Wert geht wieder in den zuvor beschriebenen Vergleich zwischen dem Master und Slave ein, und legt fest, welcher Schritt zuerst endet und setzt entsprechend die nächste Zeitmarke.

A7 Beispielszenario zweier Strebbetriebe

Das Balkendiagramm (Abbildung 0-14) veranschaulicht die errechneten Jahreswerte der drei Kombinationen eines Beispiels zweier kombinierter Strebbetriebe. Die erste Kombination Bi-di mit Bi-di erbringt demnach eine um ca. 13 % größere Kohlenmenge pro Jahr als die Kombination Bi-di mit PaWeb und um ca. 48 % mehr als die dritte Kombination. Unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils des Slave-Walzenladers ergibt sich jedoch eine andere Interpretation dieses Diagramms.

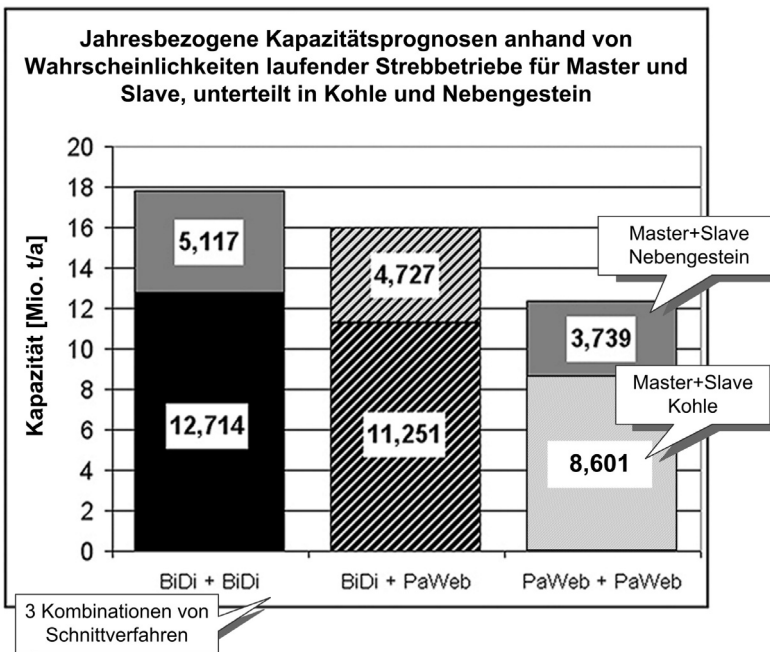


Abbildung 0-14: Prognosen der Jahresförderung der drei Schnittverfahren-Kombinationen

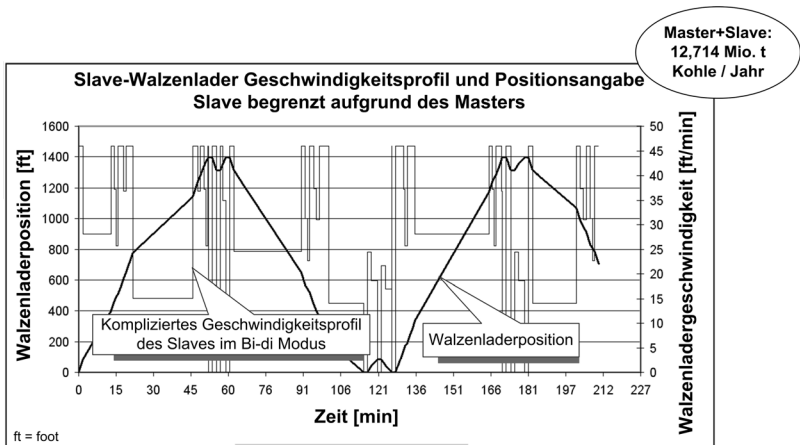


Abbildung 0-15: Geschwindigkeitsprofil des Slave-Walzenladers im Bi-di Modus

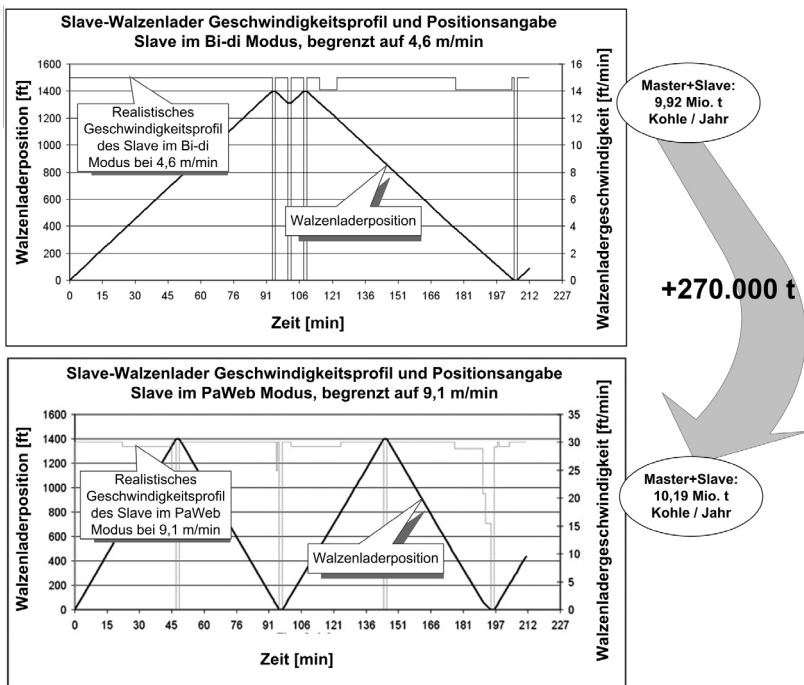


Abbildung 0-16: Fahrbare Geschwindigkeitsprofile des Slave im Bi-di und PaWeb Schnittverfahren

Das vom MSLM in Abbildung 0-15 vorgeschlagene Geschwindigkeitsprofil für den Slave-Walzenlader ist ideal, so dass das gemeinsame Band optimal ausgenutzt wird. Da es mehrere Geschwindigkeitswechsel innerhalb einer Gewinnungsfahrt beinhaltet, ist dies nur durch eine automatische Maschinensteuerung zu erreichen. Maschinenbediener sind nicht in der Lage, ein solch kompliziertes Geschwindigkeitsprofil zu fahren.

Eine Hauptaufgabe in der Benutzung dieses Teils der Simulation liegt darin, die vorgeschlagenen Geschwindigkeiten des Slave-Walzenladers auf Durchführbarkeit zu prüfen und ggf. manuell an ein realistisches Geschwindigkeitsprofil durch Begrenzung der maximal zulässigen Marschgeschwindigkeit anzupassen. Um Geschwindigkeitswechsel innerhalb der Gewinnungsfahrt zu vermeiden, muss also die Marschgeschwindigkeit auf die kleinste Größe gedrosselt und konstant gefahren werden. Eine Anpassung an die Bedienbarkeit bedeutet in diesem Beispiel eine Drosselung auf ca. 4,6 m/min (ca. 15 ft/min). Dadurch sinkt die errechnete Jahreskapazität dieser Kombination auf ca. 9,92 Mio. t/a (Abbildung 0-16, oben). Beim PaWeb muss der Walzenlader wegen der geringeren Schnitttiefe jedoch nur auf eine Marschgeschwindigkeit von ca. 9,1 m/min (ca. 30 ft/min) gedrosselt zu werden (Abbildung 0-16, unten). Nach der Anpassung der Geschwindigkeiten wird die zweite Kombination mit einer Prognose von ca. 10,19 Mio. t/a produktiver. Diese liegt um ca. 270.000 t über dem prognostizierten Wert der ersten, und entspricht ungefähr einer Fördermenge von 1,5 Wochen.

Wenn der Master einen Stillstand hat, ist der Slave nicht mehr von außen, sondern nur noch durch seine inneren Faktoren beschränkt. Weil in diesem Fall das unbeschränkte Bi-di Schnittverfahren mit ca. 1.628 t/h (Abbildung 3-9) um ca. 66 % produktiver als das PaWeb mit ca. 979 t/h ist, kann durch einen Wechsel des Schnittverfahrens in der Zeit, in der der Slave ohne äußere Beschränkung ist, die Kapazität gesteigert werden. Ein Wechsel zur produktiveren Bi-di Methode erscheint aber erst dann sinnvoll, wenn es sich um einen längeren Ausfall des Masters handelt und der Wechsel durch Training der Strebmansschaft und Voll- oder Teilautomatisierung der Betriebsmittel zügig durchgeführt werden kann.

A8 Berechnung des Mitschnitts in der selektiven Gewinnung von Kalisalz

Dieses Anwendungsbeispiel soll die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten der Simulation darstellen. In diesem Fall wurde die Simulation in der selektiven Gewinnung von Kalisalz angewendet. Alle Abbaumethoden im Bergbau wollen den Mitschnitt von Nebengestein minimieren oder vermeiden, weil unerwünschtes Nebengestein beim Lösen, beim Fördern, in der Aufbereitung und beim Lagern bzw. in der Entsorgung Kosten verursacht, die mit einer selektiven Gewinnung verringert werden können, bei der das Nebengestein entweder nicht gelöst oder untertage nach dem Lösen wieder versetzt wird.

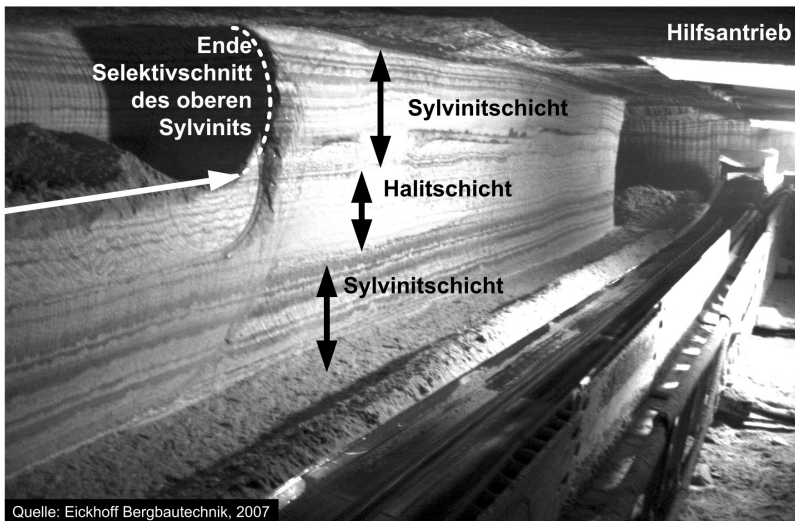


Abbildung 0-17: Selektive Gewinnung von Kalisalz im Strebbau

Besonders in der Kalisalzgewinnung ist die Vermeidung des vermischten Schnitts von Sylvinit (Kalisalz) zusammen mit dem umgebenden Halit (Steinsalz) vorteilhaft. Die Aufbereitung des gelösten Materials ist energieintensiv (z. B. im Heißlöseverfahren) und die übertägige Haldenlagerung des mitgeschnittenen Steinsalzes beansprucht große Flächen [KIRIJENKO et al._2002]. In Soligorsk, Weißrussland, wird ca. 150 km südlich der Hauptstadt Minsk in vier Bergwerken Kalisalz im Strebbau mittels Walzenladertechnik abgebaut. In den Streben mit selektiver Walzenladertechnik umschließen zwei weniger als einen Meter mächtige Sylvinitsschichten eine etwa halben Meter mächtige Halitschicht (Abbildung 0-17). Ein Streb baut die Gesamtmächtigkeit aller drei Schichten ab, jedoch wird die Halitschicht getrennt von den Sylvinitsschichten gelöst und direkt untertage im Bruchraum über Versatzschleudern verbracht. Die Förderrichtung des Strebförderers ist bei diesem System umkehrbar. Je nach geschnittenem Material wird entweder in Richtung Aufbereitungsanlage gefördert oder der Strebförderer schaltet in die entgegen gesetzte Richtung zu den Versatzschleudern um. Die dabei eingesetzten Walzenlader sind Sonderbauformen mit horizontal verschiebbaren (Abbildung 0-18) oder mit klappbaren Walzen. Es gibt Walzenlader mit zwei und drei Walzen; darüber hinaus existieren Pläne für Walzenlader mit vier Walzen.

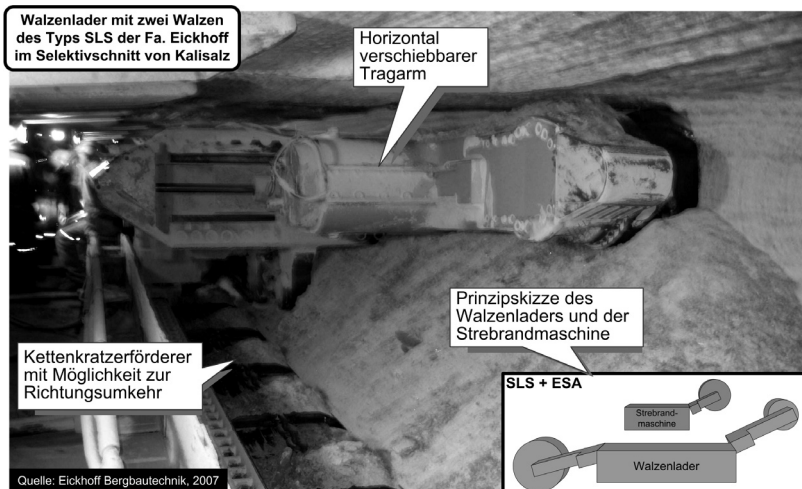


Abbildung 0-18: Selektive Gewinnung von Kalisalz mittels Walzenladertechnik

Die Aufgabe des Berechnungsalgorithmus ist die verfahrenstechnische Untersuchung von vier selektiven Walzenladerkonzepten bezüglich ihrer nicht zu vermeidenden Vermischung des Kalisalzes mit dem beibrechenden Steinsalz. Die Aufgabe bestand in der Überprüfung von vier Walzenladerkonzepten im Hinblick auf die Gewinnungskapa-

zität bei gleichzeitiger geringer Vermischung des Förderstroms mit Halit. Dabei soll herausgefunden werden, welches Konzept bei vergleichbarer Gewinnungskapazität die geringste Verunreinigung des Förderstroms mit Halit aufweist.

Die Berechnungen der gelösten Massen und der Gewinnungskapazität finden in gleicher Weise, wie bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt, statt. Dazu wurden die weltweit einmaligen Schnittverfahren, unterteilt in einzelne Verfahrensschritte, neu in der Simulation abgebildet, so dass der Algorithmus in der Lage ist, zu jedem Verfahrensschritt die gelösten Massen zusammen mit der theoretisch möglichen Marschgeschwindigkeit des Walzenladers aufgrund der folgenden Faktoren zu berechnen:

- Manuelle Geschwindigkeitsbegrenzung
- Schneidmotorleistung
- Windenmotorleistung
- Fördererkapazität

Neben der Abbildung der neuen Schnittverfahren besteht die Programmerweiterung darin, die theoretischen Vermischungen und Abbauverluste anhand der geometrischen Zuschnitte der Schnittverfahren zu quantifizieren. Der Algorithmus berechnet die Menge des Halits im Förderstrom, sowie die Menge des Sylvinites im Versatzstrom. Das geschieht wahlweise unter Berücksichtigung oder unter Ausschluss der Massen aus dem Streckenvortrieb. Mit Hilfe dieser Simulation ist der Anwender in der Lage, bestehende Systeme und neue Maschinenkonzepte aus verfahrenstechnischer Perspektive zu beleuchten und zu beurteilen. Die in den Konzepten unterschiedlichen Verunreinigungsgrade des Förderstroms mit Halit konnte der Algorithmus aufdecken und zum Verständnis des Systems der selektiven Walzenladergewinnung beitragen.

A9 Kurven von Messdaten für die Kalibrierung und Verifizierung

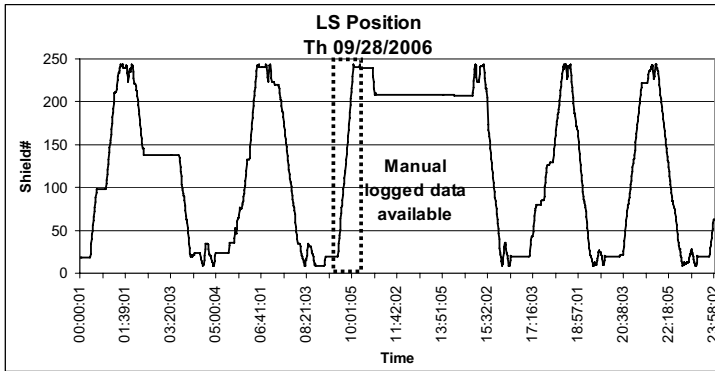


Abbildung 0-19: Zeitpunkt der manuellen Überprüfung der automatisch aufgezeichneten Daten

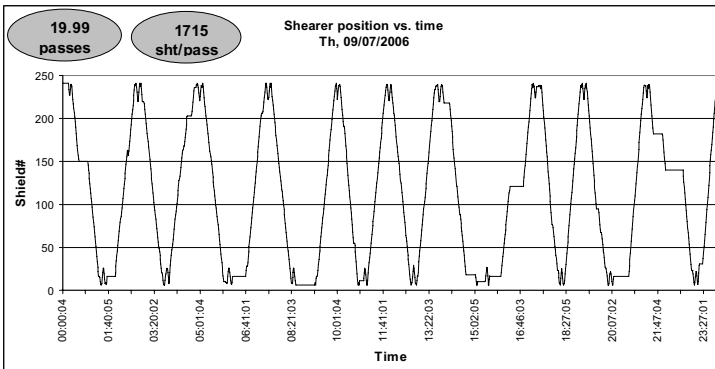


Abbildung 0-20: 1.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

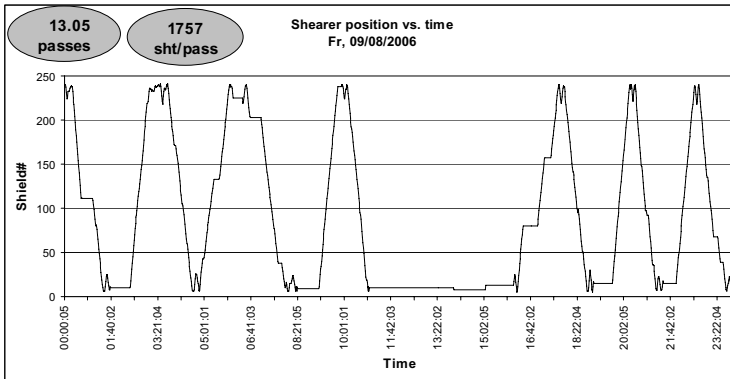


Abbildung 0-21: 2.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

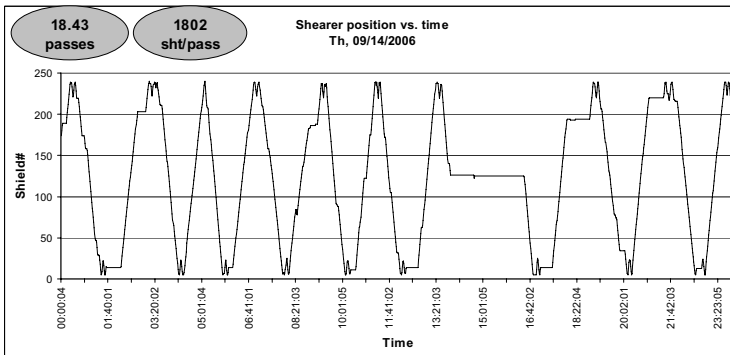


Abbildung 0-22: 3.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

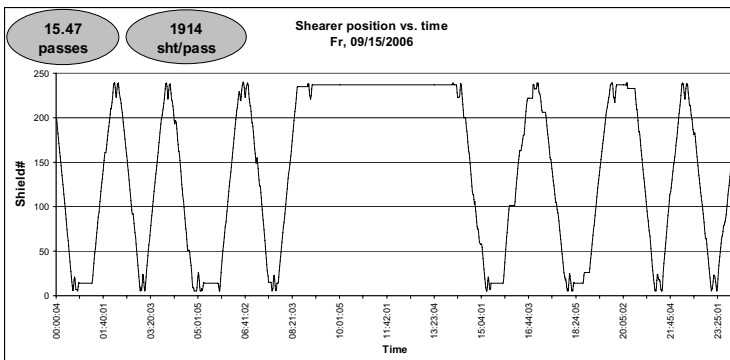


Abbildung 0-23: 4.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

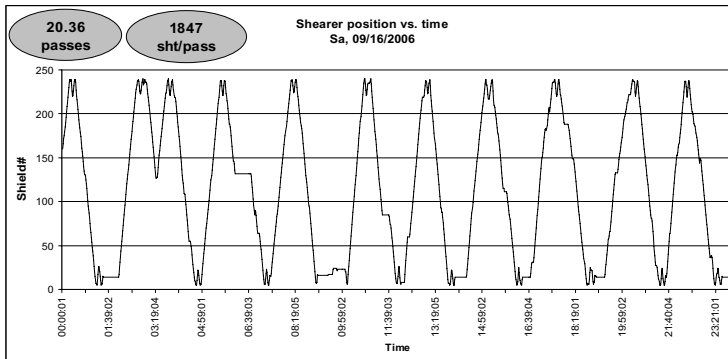


Abbildung 0-24: 5.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

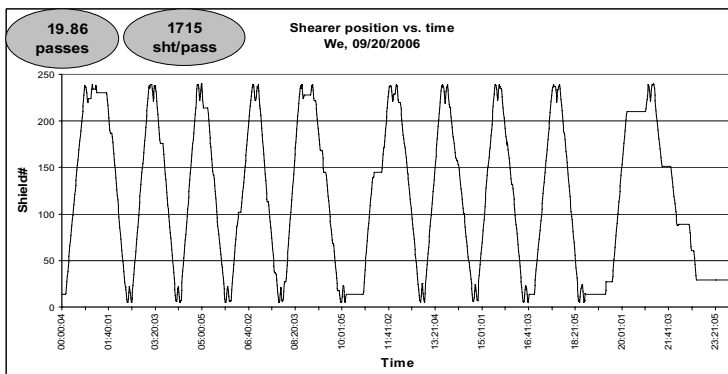


Abbildung 0-25: 6.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

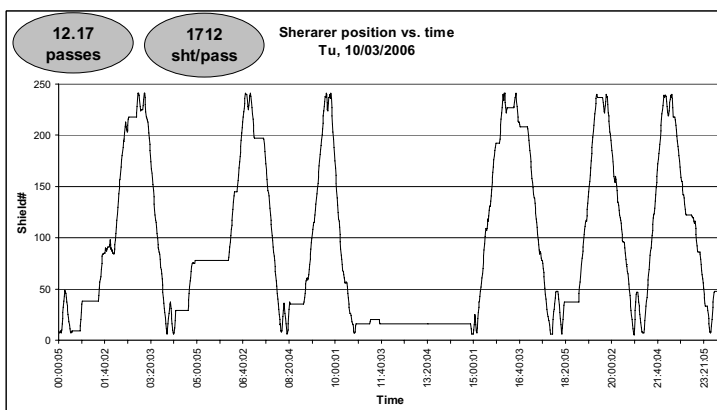


Abbildung 0-26: 7.Tag zur Berechnung der gelösten Masse pro Walzenladerfahrt

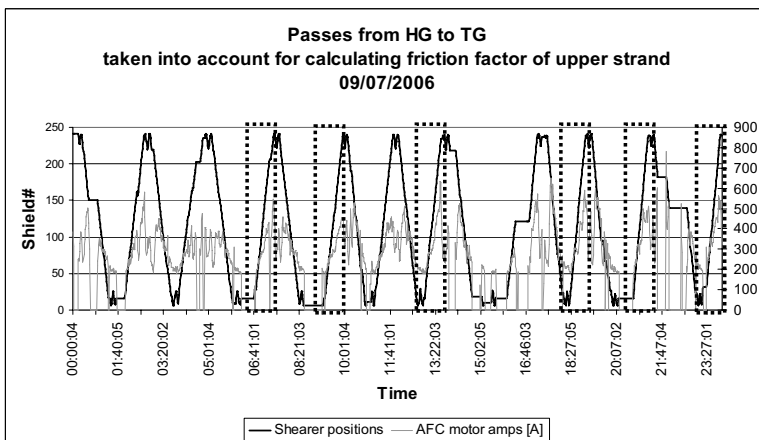


Abbildung 0-27: Situationen am 1.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum

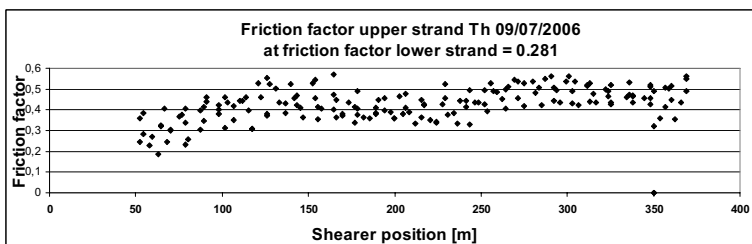


Abbildung 0-28: Bewegungswiderstand über Walzenlagerposition

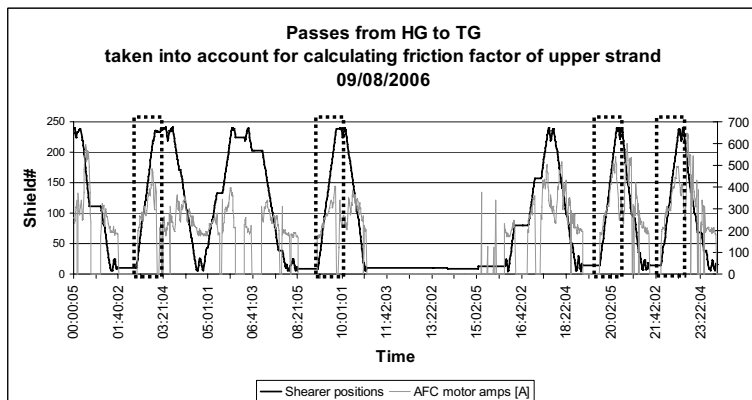


Abbildung 0-29: Situationen am 2.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum

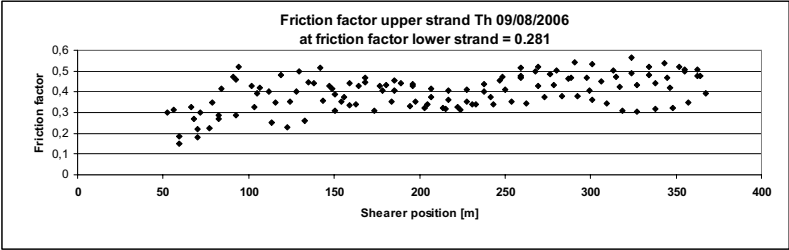


Abbildung 0-30: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition

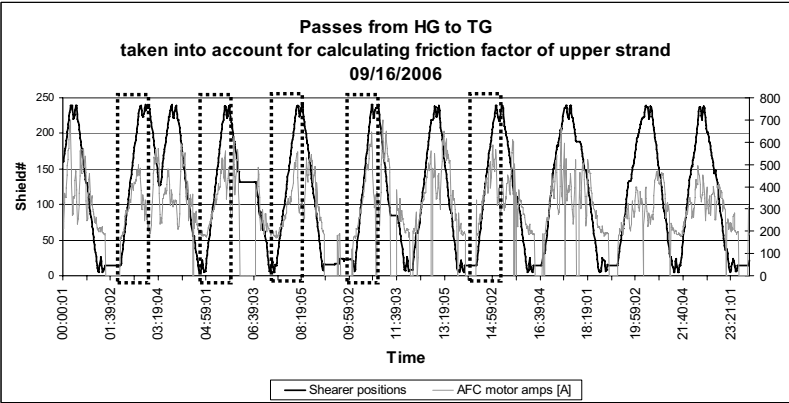


Abbildung 0-31: Situationen am 3.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum

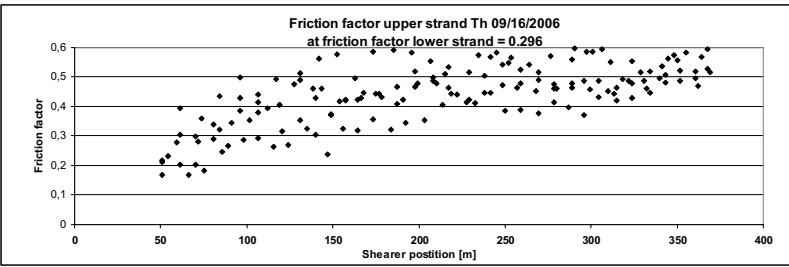


Abbildung 0-32: Bewegungswiderstand über Walzenladerposition

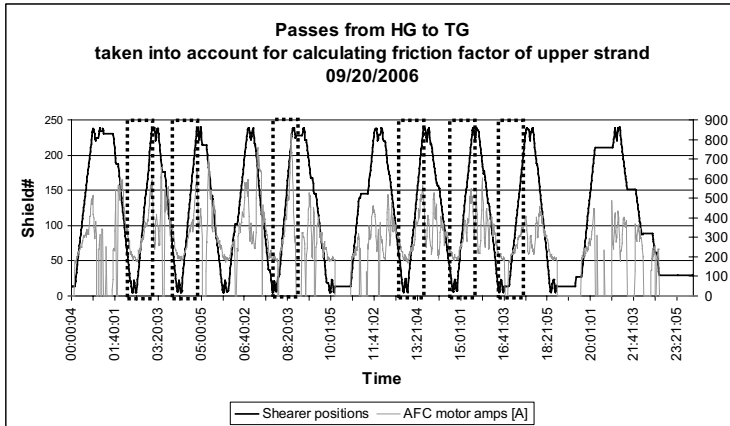


Abbildung 0-33: Situationen am 4.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum

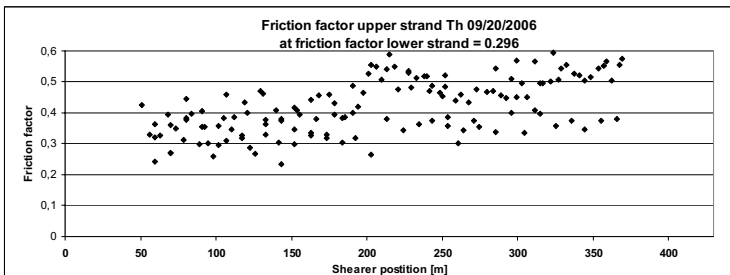


Abbildung 0-34: Bewegungswiderstand über Walzenlagerposition

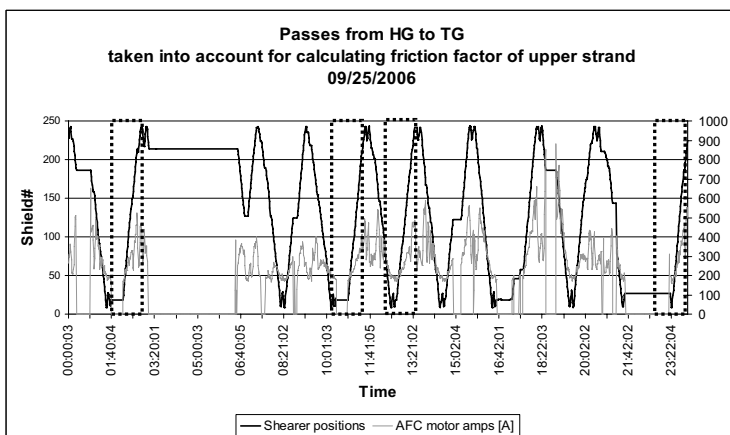


Abbildung 0-35: Situationen am 5.Tag zur Berechnung des Bewegungswiderstands im Obertrum

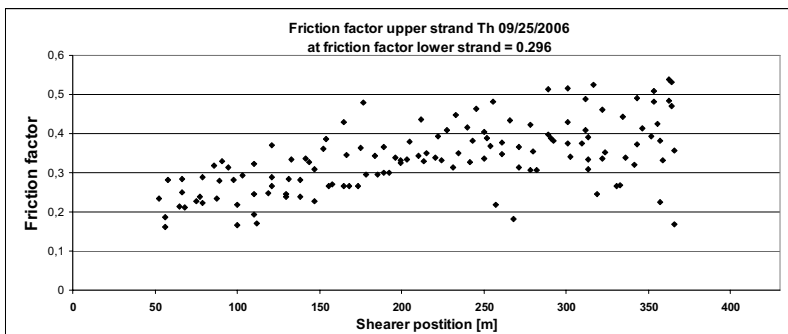


Abbildung 0-36: Bewegungswiderstand über Walzenlagerposition

A10 Kenndaten eines 1.250 hp Motors

Tabelle 3: Motorleistungsdaten des 1.250 hp Motors bei verschiedenen Betriebszuständen

P_mech[hp]	P_mech[kW]	Eta	P_el.[kW]	I[A]	n[1/min]	M [Nm]
312,500	232,906	0,960	242,535	50,6	1799,0	1236,3
625,000	465,813	0,971	479,823	78,85	1797,0	2475,4
937,500	698,719	0,979	713,634	111,98	1795,0	3717,3
1250,000	931,625	0,984	947,062	147,6	1791,0	4967,4
1562,500	1164,531	0,945	1232,178	191,25	1788,0	6219,7

Tabelle 4: Auf Nennbetriebspunkt normierte Daten

M/Mn	I/In	P/Pn
0,000	0,247	0,000
0,249	0,343	0,250
0,498	0,534	0,500
0,748	0,759	0,750
1,000	1,000	1,000
1,252	1,296	1,250

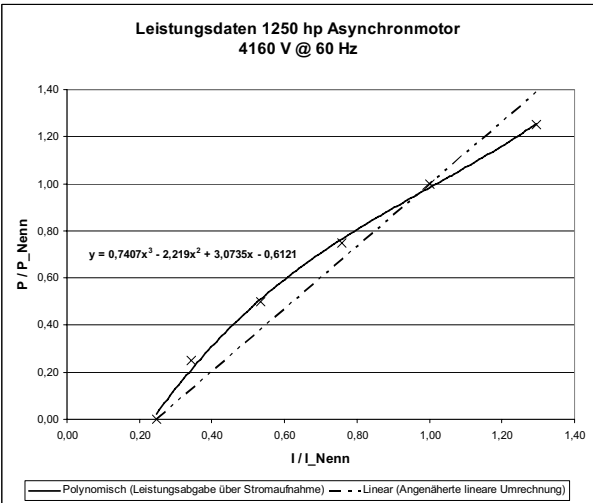


Abbildung 0-37: Umrechnungskurven von Stromaufnahme in Wirkleistung

Abstract

of the doctoral thesis „**Shearer Longwall Simulation**” by Dipl.-Ing. Ulrich Lange, Mechernich, Germany.

This doctoral thesis deals with the recent development of a longwall simulation tool for analyzing shearer operations and estimating hourly and annual production output. In most cases longwall mining refers to underground coal extraction processes. Coal is mainly used for electricity and steel production. Therefore, the coal resource made a major contribution to the Total Primary Energy Supply - having an approximately one quarter share right after the oil, which provided nearly one third of the consumed energy in 2005. Compared to other fossil fuels, coal has the largest amount of proven mineral resources, which makes the average global coal production last for at least 137 years as estimated in 2006. Coal consumption is predicted to increase from 5.3 Gt by approx. 1.8 % per year on an average within the next 24 years. As parts of the expected amounts of mineral resources will be proven global coal mining is predicted to continue even for the next 160-190 years.

Coal mining is divided into surface mining (approx. 40 %) and underground operations (approx. 60 %) which are drilling and blasting, room and pillar with continuous miners as well as shearer and plow longwall systems. Almost one third of the coal coming from deep mines is extracted by longwalls. Their main advantage is high productivity combined with low fatality numbers. Longwalls' share is expected to increase as safety and productivity is getting more and more important.

Shearer longwall systems consist of the

- Shearer to extract and load the coal onto the Armored Face Conveyor (AFC)
- AFC for conveying the coal to the main gate
- Roof supports to protect miners and machinery from falling rock

Currently, there are five common shearer cutting methods which differ in cutting height and cutting web per shearer's pass. This results in different capacities and mass flows on the conveyor belts. According to those cutting methods, the Excel based algorithm divides the shearer movement into single steps along the coal face by calculating extracted masses and consumed time whilst taking possible bottle-necks into account like e.g. the cutting motor power.

Finally the ratio of extracted coal and cycle time represents the capacity of the longwall system on an hourly basis. Considering the longwall crews' schedule as well as machine availability, an annual output is estimated.

This simulation tool is able to uncover system bottle-necks and it provides the user with expected production increase if one bottle-neck is removed. Additionally, it visualizes coal load on the belts which enables users to analyze their conveying systems. A

second implemented shearer simulates two parallel running longwalls conveying coal on one common belt. The second machine can be operated in an automatic mode that corresponds to the first longwall's coal load reaching optimized belt utilization.

The software was calibrated and verified in a coal mine of the Appalachian-Region. The following figures were calibrated:

- specific required energy for cutting and loading the coal,
- required pulling forces at the face
- friction factors of upper and lower AFC races.

The verification procedure contained a comparison of real and virtual shearer movements as well as a comparison of the real and calculated amount of coal coming from one shearer's pass. As a result of this study, a negligible difference of less than 6 % was detected in calculated and real mine data over an almost six week period.

With regards to most of the evaluation criteria, the software performance is either good or excellent, particularly the distinguished precision. Only disadvantages are a less flexible algorithm and some unfavourable settings regarding maintenance and software extension while working with Excel.

Fields of further software development are the shearer drum design, the roof support and the longwall development which can be limiting factors to the shearer speed. The algorithm should also be updated for the latest inventions of cutting very large seams by utilizing Longwall Top Coal Caving methods and mining very low seams with longwall plow systems. Object oriented programming is regarded as the new software basis which tends to match better than Excel does regarding flexibility and user-friendly interfaces.

To summarize: the described simulation tool is unique and can save a lot of time and money. It has outstanding capabilities in uncovering improvement potentials of shearer longwall systems that can be achieved only by changing cutting methods instead of installing bigger motor power.

Lebenslauf

Name : Ulrich Lange
Geburtsdatum : 22. November 1978
Geburtsort : Mechernich / Eifel
Staatsangehörigkeit : deutsch

Ausbildung und Qualifikationen

04/2004 – 07/2008 **Promotionsstudent** am Lehr- und Forschungsgebiet Betriebsmittel für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe (BGMR), RWTH Aachen.
10/1998 – 03/2004 **Bergbaustudium** an der RWTH Aachen mit den Schwerpunkten: Untertägige Rohstoffgewinnung, Maschinentechnik, Sprengtechnik
09/1997 – 09/1998 **Wehrdienst**
08/1988 – 06/1997 Städtisches **Gymnasium** Schleiden

Positionen und Arbeitserfahrung

Seit 09/2009 **Produktmanager** für Continuous Miner, Eickhoff Bergbautechnik GmbH, Bochum
04/2004 – 07/2008 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter** und **Projektingenieur** am BGMR
01/2005 – 01/2007 **Offizieller Studienberater** für Rohstoffingenieurwesen und Bergbau, Fachgruppe für Rohstoffe und Entsorgungstechnik (FRE), RWTH Aachen

Veröffentlichungen

2007 NIENHAUS, K.; LANGE, U.: „Produktionsberechnungen von Walzenlader-Strebbetrieben - Prozessverbesserung durch Bunkersimulation“; Mai 2007, präsentiert und veröffentlicht bei Konferenz "High Performance Mine Production", 30. – 31. Mai 2007, Aachen
2006 NIENHAUS, K.; BECK, K.D., LANGE, U.: „Calculations on Surge Bunkers in Longwall Mining Operations“; präsentiert und veröffentlicht bei Konferenz "Mine Planning and Equipment Selection 2006", 20. – 23. Sep 2006, Turin, Italien
2005 NIENHAUS, K.; LANGE, U.; BAYER, A.K.: „Can David compete with Goliath? - A question of shearer loader cutting methods“; präsentiert und veröffentlicht bei Konferenz "Mine Planning and Equipment Selection 2005", 31. Okt – 2. Nov 2005, Banff, Kanada
2005 NIENHAUS, K.; LANGE, U.; BAYER, A.K.: "Big is not always beautiful"; veröffentlicht in Australian Longwall Magazine, Juni 2005 und American Longwall Magazine, Mai 2005

Das Thema dieser Arbeit ist ein neu entwickelter Algorithmus zur Simulation von Walzenlader-Strebbetrieben, einer Abbaumethode, die zumeist in der Kohle zum Einsatz kommt.

Derzeit gibt es fünf verschiedene Walzenlader-Schnittverfahren, die sich in ihrer Schnitttiefe bzw. Schneidhöhe pro Maschinendurchfahrt und der damit zusammenhängenden Charakteristik in u. a. Gewinnungskapazität, Marschgeschwindigkeit und Fördererbeladung unterscheiden. Der in Excel umgesetzte Algorithmus zur Strebbasimulation, Kapazitätsberechnung und Systemanalyse teilt den Streb gemäß der verschiedenen Walzenladerbewegungen in geometrische Körper ein, die virtuell vom Walzenlader in Abhängigkeit seiner Geschwindigkeit gelöst und auf den Förderer geladen werden.

Dadurch, dass der Simulationsalgorithmus die denkbaren Engpässe prüft und aufdeckt, sind Analysen von Strebbetrieben mit Bewertung der Potenziale zur Steigerung der Produktion möglich. Zudem kann der Simulationsalgorithmus von allen Schnittverfahren die Massenströme auf dem Förderer darstellen und die Auslastung der nachfolgenden Förder- und Speichermittel bestimmen.

Der Aufbau eines zweiten Strebbetriebs im Algorithmus ermöglicht die Simulierung von zwei zeitgleich auftretenden Massenströmen auf einem gemeinsamen Förderband, mit der Möglichkeit, einen der Walzenlader automatisch gemäß der Bandbeladung des anderen zu steuern, damit das Band optimal gefüllt ist.

Der Algorithmus wurde in einem nordamerikanischen Bergwerk des Appalachen-Reviers kalibriert und verifiziert.

Zusammengefasst ist der Algorithmus mit seinen Merkmalen weltweit neu und einzigartig und besitzt ein hohes Potenzial, nicht zuletzt durch die Eignung, Produktionssteigerungen alleine durch Wechsel zu einer intelligenten Verfahrenstechnik aufzuzeigen.