

Christian Schropp

Schriftenreihe zur
Aufbereitung und Veredlung

73

Integrated mineral processing in
underground mining operations and
impact on the mine project

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

RWTHAACHEN

Integrated mineral processing in underground mining operations and impact on the mine project

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 **M.Sc. RWTH**

Christian Schropp

aus Mülheim/Ruhr

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Per Nicolai Martens

Tag der mündlichen Prüfung: 05.07.2019

Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Band 73

Christian Schropp

**Integrated mineral processing in underground
mining operations and impact on the mine project**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95700, Fax +49(0)241 - 8092232
E-Mail: lehrstuhl@ifa.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95705, Fax +49(0)241 - 8092624
E-Mail: info@teer.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba
Lochnerstraße 4 - 20
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-97246, Fax +49(0)241 - 8092635
E-Mail: amr@amr.rwth-aachen.de

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6943-3
ISSN 1617-6545

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

I Acknowledgement

I would like to dedicate the thesis to my wife Joana and son Kurt. They gave me the love and strength required to bring these pages to a close. I would also like to thank my family and friends for their support and trust.

A special thanks goes to Prof. Dr. Hermann Wotruba, my doctoral supervisor, and my colleagues at the AMR (Unit for Mineral Processing). I will never forget the fruitful work nor the fun had while conducting daily business with my colleagues and friends.

I would also like to express my gratitude to Dr. Henning Knapp (WEIR) and Dr. Christopher Robben (Tomra Solutions) for the insightful discussions and their hand in improving the investigations conducted.

For the countless hours of discussion and the exceptional teamwork demonstrated in the I²Mine project, I want to thank Dr. Markus Dammers. Furthermore, I owe a debt of gratitude to the colleagues of the former BBK1 (Institute of Mining Engineering I) for given me a second work home during the project. My gratitude also goes to Prof. Dr. Per Nicolai Martens for agreeing to be my second advisor.

Within the context of the I²Mine project I would like to express my appreciation for the 7th Framework Program for Research and Technical Development, Grant Agreement: NMP2-LA-2011-280855. A special thanks goes to Karl Erik Ranman and Evgeny Novikov for supporting the research conducted at New Boliden AB.

II Executive summary

The demand for primary resources continues to rise whereas ore grades are decreasing. It is necessary to rethink common mining and mineral processing technologies to generate innovations for a modern society. Improvements must be made to the level of environmental impact and sustainability by way of investigations conducted in the mining industry. Integrated underground processing (IUP), achieved by implementing processing steps underground, is a potential way to increase the efficiency of resource use. This thesis presents a fast track tool for evaluate the IUP approaches and impact on the mine project.

Chapter 2 describes the current state of knowledge and the literature background on underground processing concepts and potential synergy effects on the mine system. There are two types of underground processing: Stationary and semi-mobile. Examples depict the latest technologies associated with these two integration types. Chapter 3 provides an assessment matrix of different separation technologies used in the semi-mobile approach of waste rejection. This assessment matrix indicates that sensor-based sorting is the optimal option for integrated underground processing approaches.

Requirements and challenges are inherent when implementing new processes into an existing system. Chapter 4 outlines how the integration of underground processing impacts all processes related to mining activities and surface facilities. The implementation of stationary and semi-mobile processing involves underground processes such as extraction, mine ventilation and backfilling. Rejecting waste particles at an early stage of the mine production chain can lead to increased efficiency in subsequent processes. Especially a decrease in processing effort and transportation cost savings can lead to a successful economic IUP. This thesis identifies and delineates sensitive technical and economic integrations. Priority challenges involve large underground excavations and a critical amount of storable waste underground as well as an economic recovery to yield balance of the separation process.

The deterministic spread sheet model developed provides cost calculations for each main process of a mine and IUP concepts. By comparing the IUP scenarios with a conventional mine or mine project, potential costs savings and net present value (NPV) changes are discovered. The comparison is done by way of graphical evaluation. Recovery to yield ratios for positive NPV are determined which discovers economic operation at a defined waste rejection ratio. These limitations are determined for each specific case.

In total, three case studies are investigated. A cut-and-fill polymetallic mine, a sub-level stoping polymetallic mine and a room-and-pillar potash mine are used as reference cases. The results show that waste rejection by sensor-based sorting can have a positive impact on the mine project. The primary sensitive cost groups are material transportation, mineral processing and personnel. Brownfield projects are favorable due to the possibility of increased production resulting in a decreased mine life and higher NPV.

This thesis shows how integrated underground processing successfully impacts the technical and economic parameters of a mine project. The presented evaluation method can easily be added to an arsenal of tools used for early decision making in the project planning phase. Each successful implementation of IUP generates an added value for the sustainable usage of resources and low impact mining industry.

III Zusammenfassung

Die Nachfrage nach primären Ressourcen steigt während gleichzeitig Erzgehalte sinkenden. Ein Umdenken von etablierten Technologien für Bergbau und mineralische Aufbereitung ist nötig, um Innovationen für eine moderne Gesellschaft zu schaffen. Umwelteinflüsse und Akzeptanz müssen durch Forschungsarbeiten in der Bergbauindustrie verbessert werden. Integrierte Aufbereitung unter Tage, realisiert durch die Implementierung von Aufbereitungsschritten unter Tage, ist ein potenzielles Konzept für eine nachhaltige Ressourcenverwendung. Diese Arbeit präsentiert ein zeitsparendes Tool um den Ansatz der integrierten Aufbereitung untertage und die Einflüsse auf das Bergwerksprojekt zu bewerten.

Kapitel 2 beschreibt den Erfahrungsstand und den Literaturhintergrund von untertägigen Aufbereitungskonzepten und die potenziellen Synergieeffekte auf das Bergwerk. Es gibt zwei Arten von untertägiger Aufbereitung, stationär und semi-mobil. Anhand von Beispielen wird der aktuelle Stand der Technik dieser zwei Integrationstypen geschildert. Kapitel 3 stellt eine Bewertungsmatrix für verschiedene Separationstechnologien vor, für den semi-mobilen Ansatz der Bergevorabscheidung. Diese Bewertungsmatrix zeigt, dass die am besten passende Technologie für integrierte untertägige Aufbereitungskonzepte die sensorgestützte Sortierung ist.

Anforderungen und Hürden treten auf, wenn neue Prozesse in ein existierendes System implementiert werden. Kapitel 4 zeigt, wie die Integration untertägiger Aufbereitung alle verbundenen Prozesse mit den Bergwerksaktivitäten und den übertägigen Anlagen beeinflusst. Die Implementierung von stationärer und semi-mobiler Aufbereitung beeinflusst untertägige Prozesse wie Abbau, Grubenbewetterung und das Einbringen von Versatz. Ausschleusen von Bergen an einem frühen Punkt in Produktionskette des Bergwerks kann zu Einsparungen in den Folgeprozessen führen. Speziell Einsparungen bei den Transport- und Förderkosten durch die Massenreduktion als auch der verringerte Aufbereitungsaufwand können zu einer erfolgreichen ökonomischen Implementierung von integrierter Aufbereitung führen. Die Ausarbeitung identifiziert und beschreibt sensitive technische und finanzielle Hindernisse der Integration. Priorisierte Herausforderungen sind große untertägige Hohlräume und der kritische Anteil von versetzbarem Bergematerial in Zusammenhang mit einer wirtschaftlichen Massen- und Gehaltsausbringens des Separationsprozesses.

Das entwickelte deterministische Tabellenkalkulationsmodell gibt Kostenkalkulationen für jeden Hauptprozess des Bergwerks und integrierter Aufbereitung untertage wieder. Durch den Vergleich von integrierter Aufbereitung untertage mit einem konventionellen Bergwerk oder Bergwerksprojekt werden potenzielle Kosteneinsparungen und Nettobarwertinteraktionen (NPV) aufgedeckt. Der Vergleich wird durch eine grafische Evaluation dargestellt. Massen- und Gehaltsausbringverhältnisse für positive Nettobarwerte werden ermittelt. Diese zeigen den ökonomischen Betriebspunkt bei einer definierten Bergeabscheiderate. Jedes Bergwerk hat individuelle technische und ökonomische Grenzen, die die favorisierten Massen- und Gehaltsausbringen limitieren. Diese Einschränkungen müssen für jeden spezifischen Fall ermittelt werden.

Insgesamt drei Fallstudien wurden untersucht. Ein Polymetall-Bergwerk mit Firstenstoßbau, ein Polymetall-Bergwerk mit Weitungsbau mit Versatz und ein Kali-Bergwerk mit Örtersbau dienen als Referenzbergwerke.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Bergevorabscheidung mittels sensorgestützter Sortierung positive Auswirkungen haben kann. Hauptsensitive Kostengruppen sind dabei Materialtransport, Aufbereitung und Personal. Brownfield-Projekte sind aufgrund der Möglichkeit einer erhöhten Produktion, die zu einer geringeren Lebensdauer des Bergwerks und einem höheren NPV führt, vorzuziehen.

Diese Arbeit zeigt, wie sich die integrierte Untertageaufbereitung erfolgreich auf technische und wirtschaftliche Parameter eines Bergbauprojektes auswirkt. Die hier vorgestellte Evaluierungsmethode ist ein einfaches zusätzliches Werkzeug für die frühe Entscheidungsfindung in der Projektplanungsphase. Jede erfolgreiche Implementierung von IUP ist ein Mehrwert für nachhaltige Ressourcennutzung und umweltfreundlichen Bergbau.

IV Content

I	Acknowledgement	1
II	Executive summary	3
III	Zusammenfassung	5
IV	Content	7
1	Introduction	11
1.1	Motivation for the research	11
1.2	Aim of the study	12
1.3	Thesis structure	13
2	Concept of mine-to-mill integration	15
2.1	Underground mine-to-mill integration	15
2.2	Current mineral processing in underground mines	18
3	Technologies for underground processing	23
3.1	Liberation	23
3.2	Dilution	24
3.3	Separation technologies	26
3.3.1	Comminution and screening	28
3.3.2	Flash flotation	28
3.3.3	Dense media separation	28
3.3.4	Jigging	29
3.3.5	Magnetic separation	29
3.3.6	Electrostatic separation	29
3.3.7	Hand sorting	30
3.3.8	Sensor-based sorting	30
3.3.9	Assessment of separation technologies	34
3.3.10	Conclusion	37
4	Implementation of mineral processing steps underground	39
4.1	Infrastructure and underground excavations	39
4.2	Ore extraction and mine development	41
4.2.1	Suitable mining methods	42
4.2.2	Backfill	42
4.2.3	Critical volume for backfilling	44

4.3	Underground waste rejection	45
4.3.1	Plant design	46
4.3.2	Crushing	50
4.3.3	Screening	51
4.3.4	Sensor-based sorting	52
4.4	Impact on mineral processing	55
4.4.1	Bond index reduction	57
4.4.2	Fewer Consumables.....	58
4.4.3	Economy of scale.....	58
4.4.4	Cut-off-grade reduction.....	58
4.5	Material handling	59
4.6	Material storage	60
4.7	Hoisting technologies	60
4.8	Conclusion	65
5	Development of the evaluation model.....	67
5.1	Model structure.....	67
5.2	General model assumptions.....	69
5.3	Cost estimation and process calculation	70
5.3.1	Regressions analysis	71
5.3.2	Cost estimations	72
5.3.3	Extraction.....	73
5.3.4	Transportation	73
5.3.5	Backfill.....	74
5.3.6	Mineral processing	74
5.3.7	Side processes	76
5.3.8	Personnel costs.....	76
5.4	Scenario development.....	76
5.5	Evaluation methodology.....	83
5.6	Conclusion	85
6	Integrated underground processing case studies	87
6.1	Case study: cut-and-fill mine polymetallic ore	87
6.1.1	Base case description	87

6.1.2	Scenario implementation	91
6.1.3	Simulation results	93
6.1.4	Conclusion	100
6.2	Case study: Sub-level stoping polymetallic ore mine.....	100
6.2.1	Base case description	100
6.2.2	Scenario implementation	103
6.2.3	Simulation results	105
6.2.4	Conclusion	111
6.3	Case study: room-and-pillar potash mine	111
6.3.1	Base case description	111
6.3.2	Scenario implementation	115
6.3.3	Simulation results	117
6.3.4	Conclusion	123
7	Conclusion and discussion	125
8	References	127
V	List of figures.....	133
VI	List of tables.....	137
VII	List of abbreviations.....	139
VIII	Glossary.....	141
IX	List of notations	143
X	Appendix	145
	Appendix I: Example of simplified flowsheets for sensor-based sorting	145
	Appendix II: Three chamber feeder system for hydraulic hoisting	145
	Appendix III: Modules in the semi-mobile sensor-based sorting plant.....	146
	Appendix IV: Sorting test work results of the cut-and-fill case study	151
	Appendix V: Typical particle sizes for hydraulic, long-distance slurry transport	152
	Appendix VI: Geotechnical design methodology for underground excavations.....	152
	Appendix VII: Reduced pillar dimension by using waste rock as backfill material.....	153
	Appendix VIII: Mining method selection matrix.....	154
XI	List of publications	155