Erschütterungsüberwachung beim Bau von unterirdischen Wasserkraftwerken

Peter Billeter[(1)], Monika Boss[(1)] und Cosmas Savary[(2)]
[(1)]*IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3011 Bern*
[(2)]*Ziegler Consultant, Asylstrasse 41, CH-8032 Zürich*

Zusammenfassung: Vorliegende Publikation beschreibt das Ziel, die Methode und ausgewählte Resultate einer grossräumigen Überwachung von sprengbedingten Erschütterungen beim Bau von unterirdischen Wasserkraftwerken, die in unmittelbarer Nähe zu bestehenden und sich in Betrieb befindenden Anlagen erstellt wurden. Der Umgang mit bau- bzw. sprengbedingten Einwirkungen beginnt mit der Projektierung, muss in den Ausschreibungsunterlagen verankert werden und verlangt eine auf die baubetrieblichen Erfordernisse abgestimmte Überwachung während der Ausführung. Dargestellt werden die gemachten Erfahrungen bei der Projektierung und Realisierung der Kraftwerksausbauten Handeck 2A und Innertkirchen 1S/E der Kraftwerk Oberhasli AG.

1 SITUATION UND ZIELSETZUNG

1.1 *Einleitung und Zielsetzung*

Ein Teil der in der Schweiz von ca. 1930 bis 1970 realisierten alpinen Wasserkraftanlagen hat ein Produktionssteigerungspotential, das sich durch den Zubau von neuen Anlagen wirtschaftlich realisieren lässt. Dies bedingt aber häufig eine Bauausführung in unmittelbarer Nähe von bestehenden Anlagen zur Stromproduktion. Diese Anlagen dürfen durch den Zubau nicht beschädigt oder beeinträchtigt werden und sie lassen sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht ausser Betrieb nehmen.

Anlagen und Ausrüstungen von Wasserkraftwerken in den Alpen sind häufig unterirdisch installiert und auch die Ergänzungsanlagen werden unter Tag realisiert. Die Ausbrucharbeiten können, v.a. was die Triebwasserwege und die Zugangsstollen betrifft, teilweise mechanisch und entsprechend erschütterungsarm aufgefahren werden. Die Kavernen werden aber im allgemeinen sprengtechnisch ausgebrochen und auch bei den kürzeren Stollen erweist sich häufig der Sprengvortrieb (SPV) häufig als wirtschaftliche Lösung.

Der Umgang mit den Einwirkungen aus dem Sprengvortrieb beginnt frühzeitig in der Projektierung und bestimmt teilweise wie nahe Zubauten realisiert werden können. Besonders wichtig ist die Verankerung von sprengtechnischen Auflagen in der Ausschreibung und im Werkvertag. Und ebenso bedeutsam ist die Um- und Durchsetzung dieser Auflagen während der Ausführung auf der Baustelle, wobei hier immer eine Abwägung zwischen dem Schutz gefährdeter Installationen und baubetrieblichen Einschränkungen vorzunehmen ist.

Am Beispiel des Ausbauvorhabens "Tandem" der KWO mit der Erweiterungskraftwerke Handeck 2A und Interkirchen 1S/E werden die obigen einleitenden und grundsätzlichen Bemerkungen exemplifiziert, es wird das Vorgehen beschrieben und es wird von den gemachten Erfahrungen berichtet.

1.2 *Die Anlagen und das Ausbauprojekt "Tandem" der KWO*

Das Projekt "Tandem" bezeichnet die Ergänzung der beiden in Serie geschalteten Hochdruckstufen Handeck 2 und Innertkirchen 1 (vgl. Abb. 1). Dabei werden folgende neu Anlagen in unmittelbarer Nähe der bestehenden Anlagen gebaut:

Handeck 2A:

- Anpassung Einlaufbauwerk Räterichsbodensee
- Neues Oberwasser-Triebwassersystem (Druckstollen, Drosselklappenkammer mit Anschluss ans Wasserschloss und Druckschacht mit Verbindung zum bestehenden System)
- Neue Kavernenzentrale mit Anschluss unterwasserseitig ans bestehende System Handeck

Innertkirchen 1E/S

- Ergänzung Wasserschloss Kapf mit neuer Drosselklappenkammer und neuem Druckschacht, beides mit Anschlüssen ans bestehende System (Projekt Innertkirchen 1S)
- Neue Kavernenzentrale, neuer Unterwasserstollen und neues Ausgleichsbecken mit mehreren Anschlüssen ans bestehende System (Projekt Innertkirchen 1E)

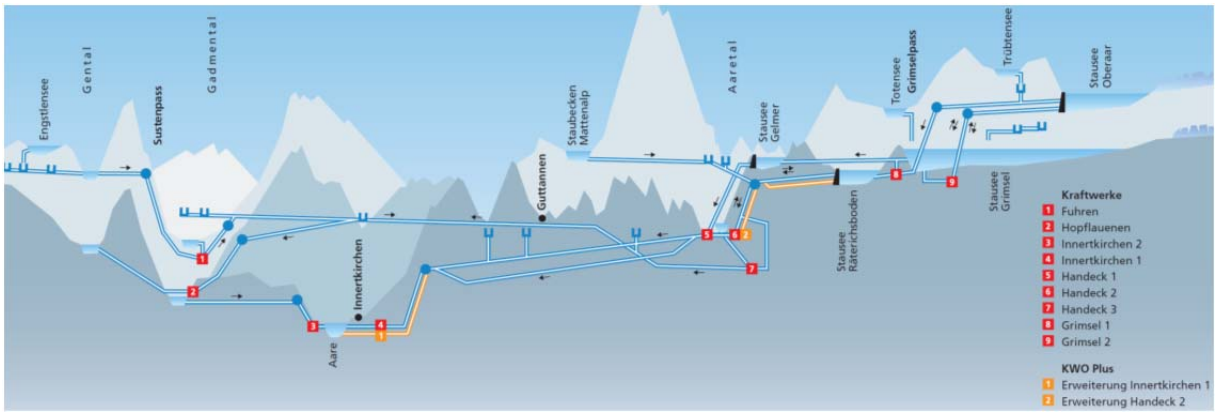

Abb. 1: Schematisches Längenprofil des KWO Anlagenparks mit den zugebauten Anlagen des Tandem, der Anlagen KW Handeck 2A und Innertkirchen 1E (Quelle: Grafik KWO)

Die Visualisierungen der beiden neuen Kavernenzentralen (Nebenkavernen) Handeck 2A und Innertkirchen 1E sind in Abb. 2 zu finden. Die hydraulische und betriebliche Optimierung führte zu einer engen räumlichen Verflechtung der neuen und bestehenden Anlagen, was in Abb. 2 gut erkennbar ist. Aus dieser engen Verflechtung ergeben sich zwangsläufig erhöhte Anforderungen an ein betriebsverträgliche und damit kontrollierte und schonende Bauweise der Zubauten.

In Abb. 2 sind auch Angaben zur maschinentechnischen Ausrüstung zu finden. Die Leistungssteigerungen sind signifikant und betragen 63 % bzw. 68 %. Dies bedingte faktisch auch eine Verdoppelung der Fliessquerschnitte im Triebwassersystem, wobei durch eine optimierte Querschnittswahl auch eine effektive Produktionssteigerung durch die Reduktion der Fliessverluste erreicht werden konnte.

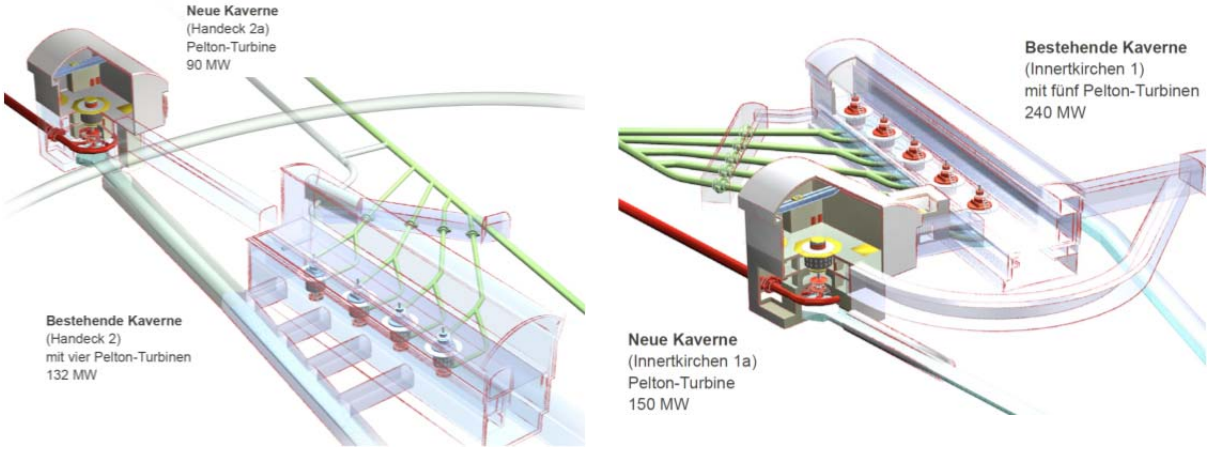

Abb. 2: Visualisierungen der Nebenkavernen Handeck 2A (links) und Innertkirchen 1E (rechts) mit Angaben zu Ausrüstung und Leistung (Quelle: Grafik KWO)

2 VORGEHENSKONZEPT ZUR BEGRENZUNG DER ERSCHÜTTERUNGSEINWIRKUNG

2.1 *Massnahmen in Projektierung*

Der Design von Kraftwerksergänzungen wird hauptsächlich von hydraulischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Kriterien bestimmt. Die bautechnische Machbarkeit beeinflusst v.a. das Kriterium der Wirtschaftlichkeit. Entsprechend sind Auswirkungen bei der Erstellung bereits in der Projektierung zu berücksichtigen. Dabei wurden folgende Schritte vorgenommen:

1. *Erfassungen der heutigen Schwingungsbeanspruchung*
   Mit der Messung der heute durch den Betrieb generierten Schwingbeanspruchung kann die vorhandene dynamische Belastung bezüglich Grösse und Frequenzbereichen erfasst werden, was eine substanziellere Beurteilung der durch den Bau bedingten Einwirkungen erlaubt (vgl. Abschnitt 4.3).

2. *Ermittlung empfindlicher Anlagen und Bestimmung der zulässigen Einwirkungen*
   Es werden die relevanten d.h. bezüglich der Einwirkungen aus dem Bauvorgang empfindlichen Anlagekomponenten erfasst. Die dort zulässigen Einwirkungen werden anhand von Normen (z.B. SN 640'312a, DIN 4105-3, ISO 10'816), der Erfassung des Istzustands (vgl. 1.) sowie den Erfahrungen bei vergleichbaren Situationen festgelegt (siehe als Beispiel Tab. 1).

3. *Prognose der erwarteten Einwirkungen und Prüfung der bautechnischen Machbarkeit*
   Die durch die Ausführung der geplanten Zubauten bedingten Erschütterungseinwirkungen werden prognostiziert, womit sich (a) die bau- bzw. sprengtechnische Machbarkeit überprüfen lässt und (b) Randbedingungen für die Bauausführung formuliert werden können.

4. *Festlegung eines Mess- und Überwachungskonzept für die Bauausführung.*
   In dieses Konzept fliessen die Erkenntnisse aus den Punkten (2.) und (3.) ein und daraus werden die bau- und sprengtechnischen Auflagen in den Besonderen Bestimmungen der Baumeisterausschreibung abgeleitet. Als Beispiel sind Elemente des Konzepts für die Ausführung des Tandems in Abschnitt 3 dargestellt.

2.2 *Massnahmen in der Ausschreibung*

Auflagen, die direkt den Bauvorgang und die baubetrieblichen Abläufe des Unternehmers beeinflussen, müssen in den Ausschreibungsunterlagen der Baumeisterarbeiten detailliert und klar nachvollziehbar beschrieben sein. Dies gilt namentlich für Einschränkungen beim Sprengvortrieb, wie eine Reduktion der Lademengen und Abschlagslängen sowie bei Teilabschlägen oder Sektorzündungen.

Bei der Ausschreibung von Sprengarbeiten mit schonendem Sprengen stellt sich immer die Frage, ob **(a)** die Arbeiten funktional auszuschreiben sind, d.h. der Unternehmer kalkuliert den Angebots global für den betroffenen Abschnitt und trifft selbst Annahmen darüber, mit welchem Sprengvorgehen er die Einhaltung der geforderten Grenzwerte gewährleisten kann. Oder aber ob **(b)** die Massnahmen zur Minderung der Sprengimmissionen als Positionen im Leistungsverzeichnis auszusetzen sind und dann auf Anordnung der Bauleitung wirksam werden.

Im vorliegenden Fall wurde die Variante (a) vorgezogen, da als Eignungskriterium der Anbieter eine grosse Kompetenz beim Sprengvortrieb verlangt wurde. Die Variante (b) wurde als für die Bauherrschaft ungünstiger beurteilt, da sie mehr Anlass zur Spekulation gibt. Die Auflagen für das schonende Sprengen wurden nach folgenden Grundsätzen in Ausschreibung und Werkvertrag verankert:

- Die Messorte mit Begrenzung der Erschütterungsimmissionen und die dort geltenden Alarm- und Grenzwerte werden klar definiert. In Tab. 1 ist ein Beispiel der gewählten Alarm- und Grenzwerte gegeben. Ebenso sind die Abschnitte auszuweisen, in denen schonendes Sprengen vorzusehen ist.
- Die maximal zulässigen Erschütterungsgrenzwerte dürfen zu keinem Zeitpunkt überschritten werden. In der Ausführung werden Alarmwerte festgelegt, bei welchen Massnahmen zur Erschütterungsreduktion zu treffen sind. Die Alarmwerte betragen 50 - 67 % der zulässigen Erschütterungen.
- Alle Aufwendungen zur Einhaltung der zulässigen Erschütterungen für Spreng- und Ausbrucharbeiten (z.B. Teilabschläge, verkürzte Abschlagslängen, Sprengen mit reduzierten Lademengen, usw.) sind in die ausgeschriebenen Positionen einzurechnen. Die Vergütung sämtlicher Aufwendungen zur Einhaltung der Grenzwerte erfolgt mit einer globalen Zuschlagsposition gemäss Leistungsverzeichnis. Allfällig notwendige Probesprengungen sind im Angebot einzurechnen.

- Bei der Berechnung der Sollbauzeit erfolgt kein Zuschlag für die damit verbundenen Einschränkungen.
- Ausserhalb dieser Bereiche und ohne Anordnung der Bauleitung besteht kein Anspruch auf Vergütung eines Zuschlags für schonendes Sprengen/Ausbruch, sämtliche Aufwendungen zur Einhaltung der zulässigen Erschütterungen sind in die normalen Ausbruchpreise einzurechnen.
- Generell werden Maschinen, Absperrorgane und Wasserwege für die Spreng-/ Ausbrucharbeiten nicht speziell ausser Betrieb genommen. Eine Ausserbetriebnahme geschieht nur, dann wenn für den Vortrieb zwingend nötig (Grenzwertüberschreitung bei kleinsten Abschlägen).

Die in der Ausschreibung vorgegebenen Grenzwerte der Erschütterungsimmissionen wurden aufgrund der Häufigkeit und der Empfindlichkeit der Bauwerke differenziert (vgl. Tab. 1). Bei Spreng- und Ausbruchsarbeiten handelt es sich i.a. um gelegentliche Einwirkungen. Die Empfindlichkeit bezüglich Erschütterungseinwirkung ist je nach Anlagenteil und Betriebszustand unterschiedlich festzulegen.

Tab. 1: Erschütterungsgrenzwerte für Spreng- und Ausbruchsarbeiten (gelegentliche Einwirkungen) in und ausser Betrieb der Anlagen

Anlagen und Betriebsgebäude KWO	*Zulässiger Schwinggeschwindigkeitsvektor v_R am Messort*
Drehende Maschinen **in Betrieb**, am Lagerfuss	$v_R \leq 7$ mm/s (ganzer Frequenzbereich)
Absperrorgane und Sekundäranlagen **in Betrieb**, Messort am Lagerfuss	v_R <15 mm/s (<30 Hz), <20 mm/s (30 bis 60 Hz), <30 mm/s (>60 Hz)
Vorgabe für Ausbrüche in unmittelbarer Nähe von betriebs- und sicherheitsrelevanten Anlagen: - Maschinen und Absperrorgane **ausser Betrieb** - Messorte am Lagerfuss - Gestufte Alarm- bzw. Grenzwerte	v_R < 20 mm/s (ganzer Frequenzbereich) Ausbruch zulässig, vorgängige Information der Bauleitung
	Alarmwert I: v_R = 20 mm/s Massnahmen zur Erschütterungsreduktion nach Möglichkeit ergreifen, vorgängige Information der Bauleitung
	Alarmwert II: v_R = 30 mm/s Massnahmen zur Erschütterungsreduktion zwingend vornehmen, weitere Sprengung nur nach Rücksprache mit Bauleitung
	Grenzwert I: v_R = 40 mm/s maximal N Überschreitungen zulässig während ganzen Bauarbeiten
	Grenzwert II: v_R = 60 mm/s keine Überschreitungen zulässig während ganzen Bauarbeiten
Bausubstanz allgemein	v_R <20 mm/s (<30 Hz), <30 mm/s (30 bis 60 Hz), <60 mm/s (>60 Hz)
Steuerungen und Elektronik **in Betrieb**	v_R < 10 mm/s (ganzer Frequenzbereich)

2.3 *Massnahmen in der Ausführung*

Als Massnahmen der Bauausführungen vorgenommen wurden (a) die Zustandserhebung vor Baubeginn, (b) die Überwachung und Alarmierung während der Bauausführung und (c) die Dokumentation, Auswertung und Nachkontrolle nach Bauende. Die Punkte (b) und (c) sind in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

3 MESSUNG, ÜBERWACHUNG UND ALARMIERUNG

3.1 *Messkonzept und Messstellennetz*

Die verschiedenen Baustellen des Tandem-Projekts befanden sich entlang eines Talabschnitts von rund 15 km Länge im Oberhasli. Die Überwachung der spreng- und allgemein baubedingten Erschütterungen bei der Realisierung der geschah an folgenden Standorten (vgl. Abb. 3):
Bereich KW Intertkirchen 1S/E:
- Kraftwerk Innertkirchen 1 (siehe Abb. 4): Kavernenzentrale und Schieberkammer
- Kraftwerk Innertkirchen 2: Zentrale, Schieberkammer, Wasserreservoire und Wohngebäude
- Wasserschloss Kapf: Wasserschlosskammer, Windenkammer und neben heutiger Drosselklappe

Bereich KW Handeck 2A:

- Kraftwerk Handeck 2: Zentralengebäude, Schieberkammer
- Wasserschloss Handeckfluh: Windenkammer, Drosselklappe, Druckwaage
- Gerstenegg: Seilbahn, Kabelstollen, Erschliessungsstollen, Grundablass, Schieberkammer

Wie im folgenden Abschnitt 3.2 beschrieben, verlangte die grosse Distanz zwischen den einzelnen Messorten sowie deren Lage unter Tag ein besonderes Datenerfassungssystem.

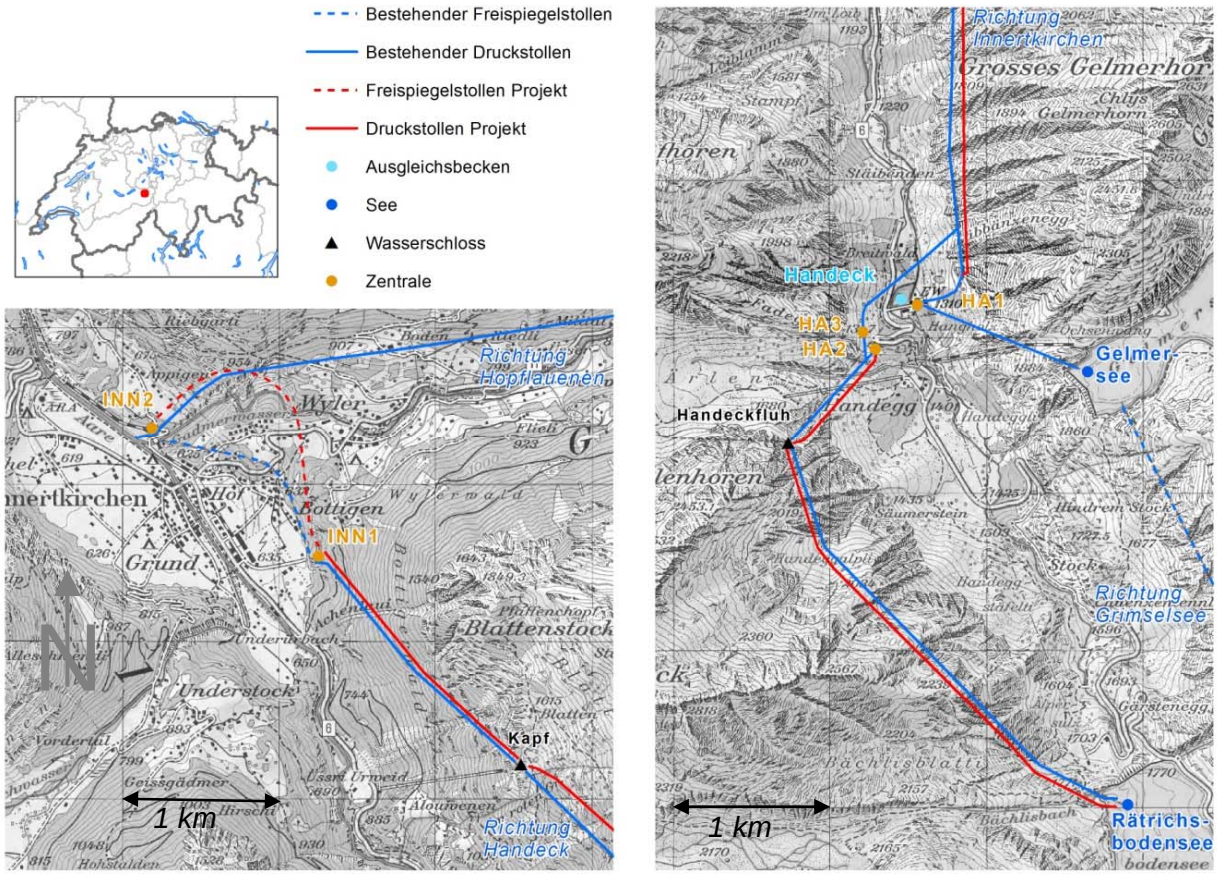

Abb. 3: Situation der Kraftwerke Handeck und Innerkirchen mit den wichtigsten Anlagen.

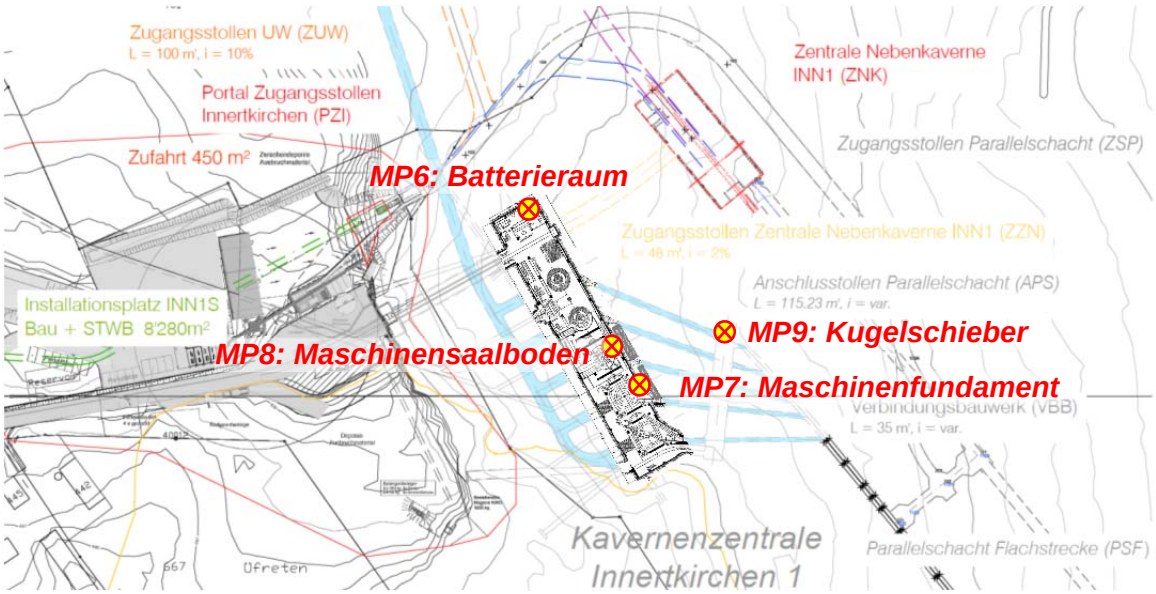

Abb. 4: Situation KW Innertkirchen 1 (bestehend und neu) mit Messpunkten 6 bis 9 in bestehender Anlage.

3.2 *Datenerfassung, Datenübertragung und Datenhaltung, Alarmierung*

Aufgrund der grossen räumlichen Ausdehnung der zu überwachenden Anlagen und deren Situierung unter Tag war ein besonders konfektioniertes System zur Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung und Alarmierung notwendig. Dazu kam die Anforderung von Bauleitung und Bauunternehmung, dass (a) eine Alarmierung auf Mobiltelephon bei Alarm- und Grenzwertüberschreitungen erfolgen muss und dass (b) die aktuellen Daten online verfügbar zu sein haben. Das speziell konfektionierte Erfassungssystem ist nachfolgend beschrieben.

Die Erfassung der Messdaten des Sensors (Schwinggeschwindigkeit) erfolgt im Datenlogger MR2002. Die analogen Signale des Sensors werden im Datenlogger mit 800 Abtastungen pro Sekunde digitalisiert, gefiltert und in einen Ringspeicher geschrieben. Übersteigt das Signal einen vorgegebenen Schwellwert (Trigger) werden die Daten aus dem Ringspeicher in den Ereignisspeicher kopiert und als Ereignisfile weggeschrieben. Dank der Verwendung des Ringspeichers kann auch der Zeitverlauf vor Erreichen der Trigger Schwelle ins Ereignisfile geschrieben werden (pre-event memory). Zusätzlich werden die Spitzenwerte der Messdaten in einem bestimmten Zeitintervall (hier 4 Minuten) in ein sogenanntes Peakfile weggeschrieben. Damit können auch Ereignisse unterhalb des Schwellwertes zumindest in Uhrzeit und maximaler Amplitude nachgewiesen werden.

Die Daten aus dem Ereignisspeicher des Messgerätes können über eine serielle Schnittstelle (RS-232) am Gerät ausgelesen werden. Diese Schnittstelle dient auch zur Parametrierung des Gerätes. Ein Termserver (Wandler RS-232 – Ethernet) verbindet das Messgerät mit dem Kommunikationsnetz der KWO. Dieses erstreckt sich auf insgesamt 35 km in den vorhandenen Galerien vom Oberaar bis nach Innertkirchen und Gadmen. Der Zugriff von aussen wird über einen GPRS/UMTS Router in der Zentrale Innertkirchen sichergestellt. Dieser verbindet sich über das NATEL Netz mit einer VPN Verbindung mit dem Server in Zürich, der mit den Messgeräten kommuniziert. Alle 4 Minuten werden die letzten Einträge aus dem Peakfile und verschiedene Statusinformationen abgefragt.

Es wird auch geprüft, ob neue Ereignisfiles vorhanden sind. Ist dies der Fall, werden diese auf den Server kopiert und die beteiligten Personen via SMS über den Spitzenwert der neuen Registrierungen informiert. Nach ca. 10 Minuten sind die Registrierungen der letzten Sprengung als Zeitverlauf auf dem WEB-Server verfügbar.

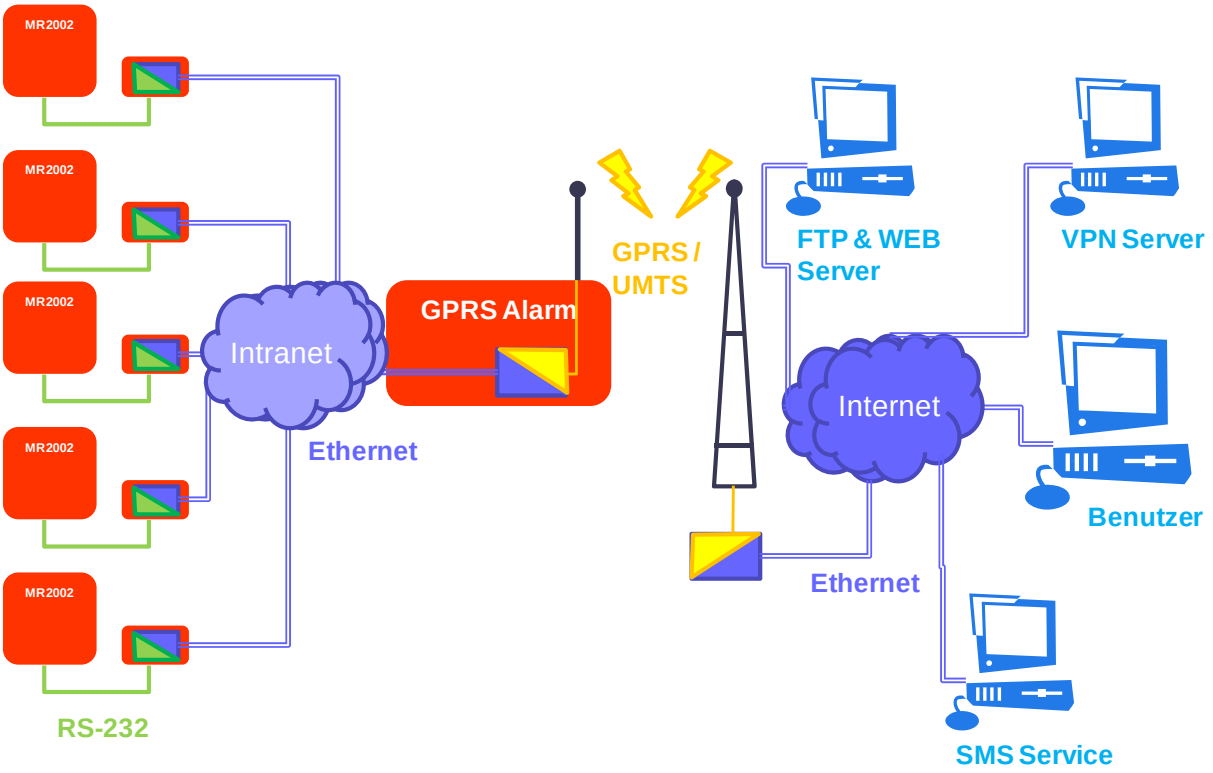

Abb. 5: Schematische Darstellung der Datenübertragung und des Datenzugriffs

Der Zugriff auf die im Server abgelegten Files von aussen erfolgt über den WEB-Browser. Die Daten bleiben auf dem Server und sind während einem Monat abrufbar. Der Pegelschrieb und die Statusinformationen werden auf dem Server graphisch für ein oder für eine Gruppe von Messgeräten dargestellt (siehe Abb. 6 und Abb. 7). Dies erlaubt einen schnellen Überblick über die Erschütterungen und den Zustand der Geräte.

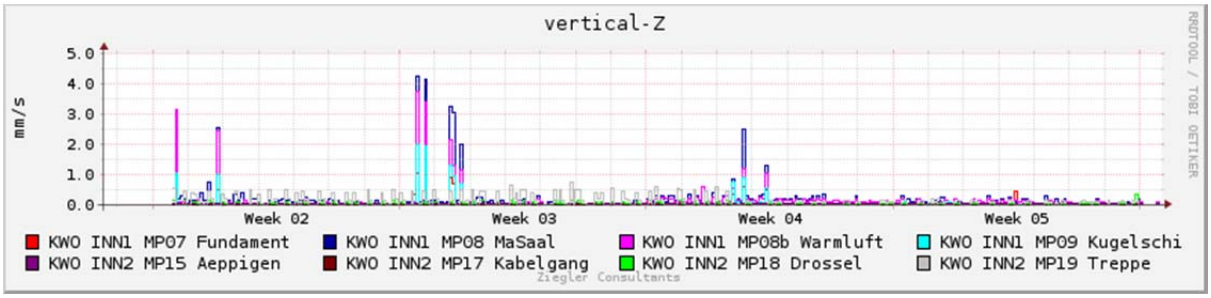

Abb. 6: Pegelschrieb Schwinggeschwindigkeit für mehrere Messgeräte. Die einzelnen Spitzen sind Sprengungen die von mehreren Geräten aufgezeichnet wurden.

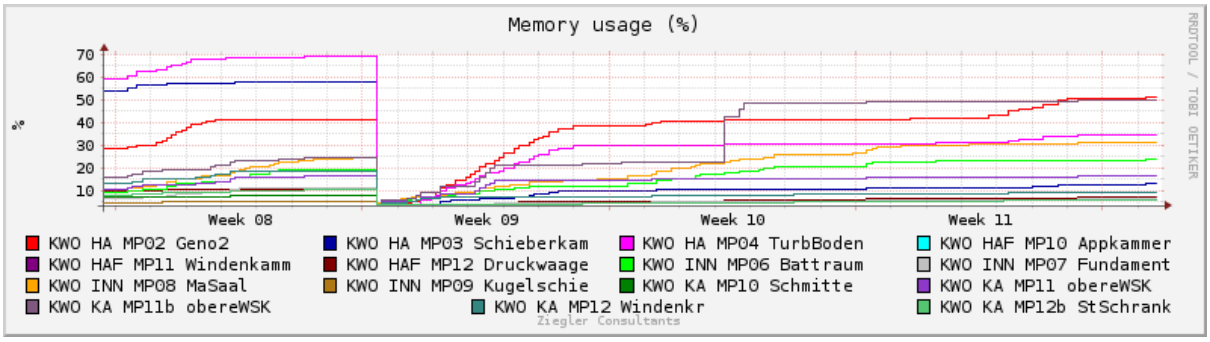

Abb. 7: Speicherbelegung der Messgeräte.

3.3 *Datenanalyse*

Die Datenaufbereitung und Auswertung der transienten Sprengsignale (wie auch der stationären und instationären Signale der Turbinen) geschieht wie in Billeter (2004) näher beschrieben und fusst auf den Ansätzen, die Bendat & Piersol (1986) aufgezeigt haben.

4 AUSGEWÄHLTE RESULTATE UND ANALYSEN

4.1 *Überwachung und Beweissicherung*

Die registrierten Signale infolge sprengbedingter Erschütterungen wurden wie oben beschrieben erfasst und für die Überwachung bzw. Beweissicherung als maximaler Schwinggeschwindigkeitsvektor v_R in Funktion der Zeit dargestellt. Die Abb. 8 zeigt eine typische Zeitreihe der bezüglich Immissionen optimierten Sprengungen (ausgeglichene Einwirkung von Einbruch-, Helfer- und Profilschüssen). In Abb. 9 ist die Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeitsvektoren v_R in Funktion der Überwachungsdauer dargestellt. Mittels dieser Erfassung wurden der Sprengvortrieb und damit die Lademengen der Abschläge in den sensiblen Abschnitten gesteuert.

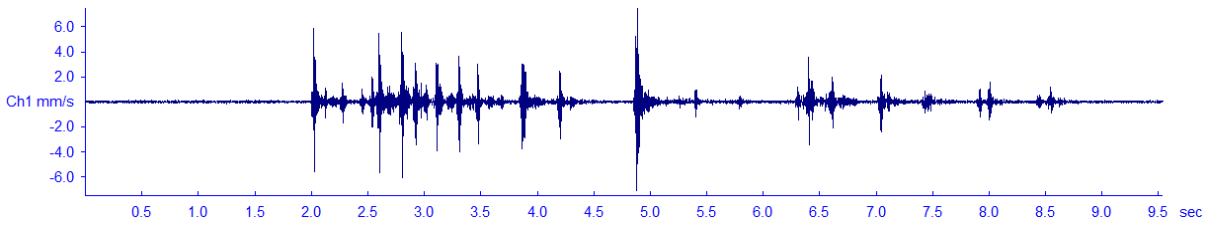

Abb. 8: typische Zeitreihe der Schwinggeschwindigkeit (Innertkirchen 1, Maschinensaalboden Ch1 = $v_{x,hor}$).

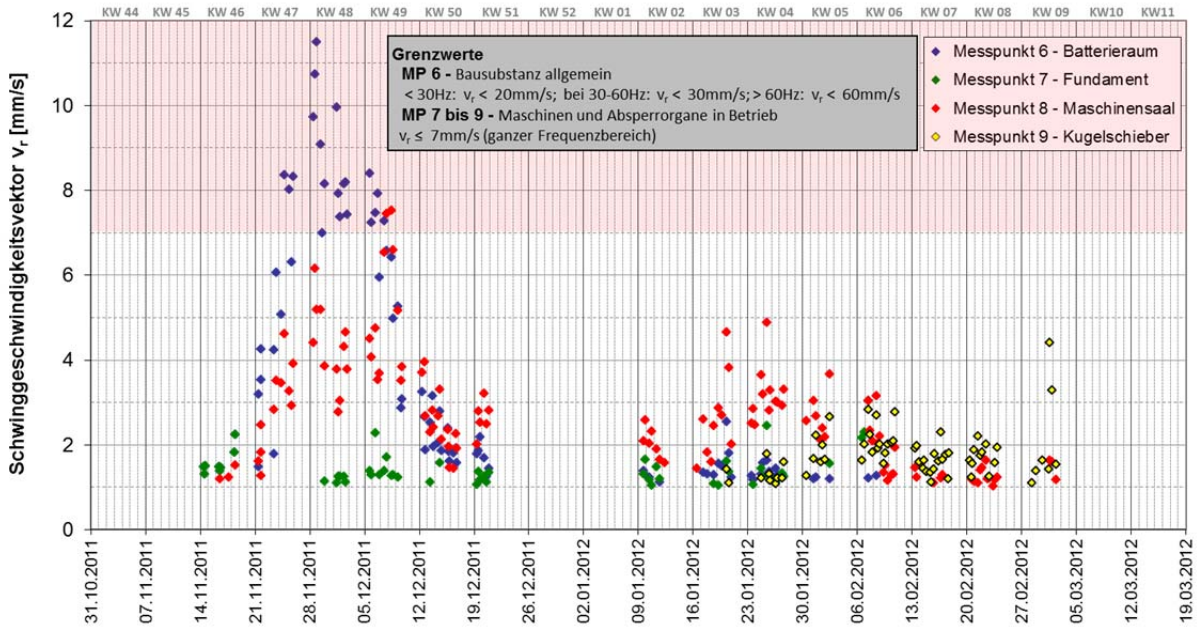

Abb. 9: Überwachung der Schwinggeschwindigkeitsvektoren v_R in der bestehenden Zentrale Innerktkirchen 1. Wie ersichtlich, konnten die zulässigen Werte im Betrieb von 7 mm/s bei den MP7, 8 und 9 gerade eingehalten werden (1 Überschreitung). Die Einhaltung der Grenzwerte bei MP6 war unproblematisch.

4.2 *Erschütterungs-Abstandsbeziehungen am Beispiel der Zentrale Innerkirchen*

Zwischen den Sprengorten für die Erstellung den neuen Zentrale Innerkirchen 1E und den Messorten der Schwinggeschwindigkeiten in der heutigen Zentrale bzw. Schieberkammer lag ein Abstand von 20 bis 140 m. Gesprengt wurde im Durchschnitt mit einer Lademenge von 0.2 bis 3 kg pro Zündstufe, wobei der Flüssigsprengstoff Emulga mit einer Detonationsenergie von rund 3 MJ/kg verwendet wurde. In Abb. 10 sind die maximalen Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Entfernung R zwischen Sprengort und Messort dargestellt. Zudem sind die Prognosebänder nach Westine (1978) bei unterschiedlichen Lademengen je Zündstufe für Innertkirchner Gneis (c_p = 3‘200 m/s, ρ = 2‘650 kg/m^3) dargestellt. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten aus dem Sprengvortrieb, stimmen gut mit der Prognose nach Westine überein.

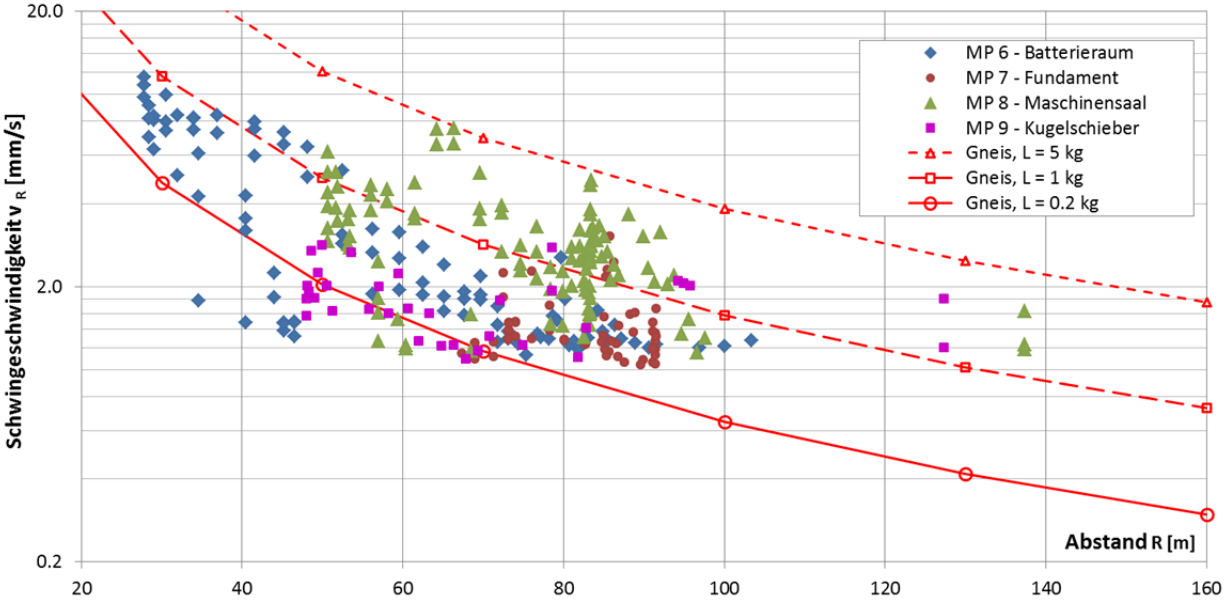

Abb. 10: Schwinggeschwindigkeitsmaxima - Abstands-Beziehung der Sprengeinwirkungen in der Zentrale Innertkirchen 1 und Prognosewerte nach Westine (L = Lademenge pro Zündstufe).

4.3 *Detailanalysen in Zeit- und Frequenzraum, Vergleich mit den Betriebseinwirkungen*

Während des Sprengvortriebs traten bei den Maschinen der bestehenden Zentrale Innertkirchen 1 Schwinggeschwindigkeitsmaxima bis rund 7.5 mm/s in Lagernähe auf dem Maschinensaalboden und bis ca. 3 mm/s am Maschinenfundament auf. Die Erschütterungen lagen damit cirka um einen Faktor 5 bis 6 über den Schwinggeschwindigkeiten im Betrieb. Aus der Integration der Geschwindigkeitssignale ergaben sich Deflektionen von rund 3 Mikron am Fundament und knapp 14 Mikron auf Niveau Maschinensaalboden auf. Es somit liegen die Sprengeinwirkungen bezüglich Deflektion nur geringfügig über den Betriebseinwirkungen und es besteht ein genügender Abstand zum untersten Grenzwert der Wellenüberwachung, der 100 Mikron beim Turbinenlager beträgt. Die Darstellung der maximalen Messwerte in Bau und Betrieb ist in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Vergleich der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege im Betrieb und beim Sprengvortrieb.

Gemessene Erschütterungen	**Stationärer Turbinenbetrieb Volllast**	**Sprengvortrieb**
Maschinensaalboden M5		
- Schwinggeschwindigkeit	1.30 – 1.50 mm/s	7.5 mm/s
- Schwingweg	5.1 – 8.1 µm	13.6 µm
Fundament M5		
- Schwinggeschwindigkeit	0.18 – 0.23 mm/s	3.0 mm/s
- Schwingweg	0.8 – 1.1 µm	3.0 µm

Werden die Erschütterungseinwirkungen aus dem Betrieb und dem Sprengvortrieb im Frequenzraum anhand von Spektren verglichen, so zeigt sich folgendes: Im Amplitudenspektrum (Abb. 11) des Bewegungsvektors bei den Sprengungen (blaue Linien) in einzelnen Abschnitten über den Spektralwerten im Betrieb (rote Linien).

Die dominierenden, durch die Drehzahl und die Maschineneigenschaften bedingten Schwingmodi des Betriebs sind stärker als die Maxima aus den Sprengerschütterungen. Zudem werden durch die Sprengerschütterungen keine Eigenmodi der Bausubstanz dominant angefacht. Die durch die Sprengungen erzeugten Vibrationen sind im Spektrum nicht signifikant stärker als die Vibrationen aus Betrieb.

Im Spektrum betrachtet (siehe Linien in Rottönen im Leistungsspektrum der Schwinggeschwindigkeit in Abb. 11), treten die Drehfrequenz f_0 = 7.1 Hz und verschiedene Produkte der Drehzahl mit der Düsenanzahl, der Becheranzahl und der Polpaaranzahl dominant auf (14.2 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, sowie die Schwebungen).

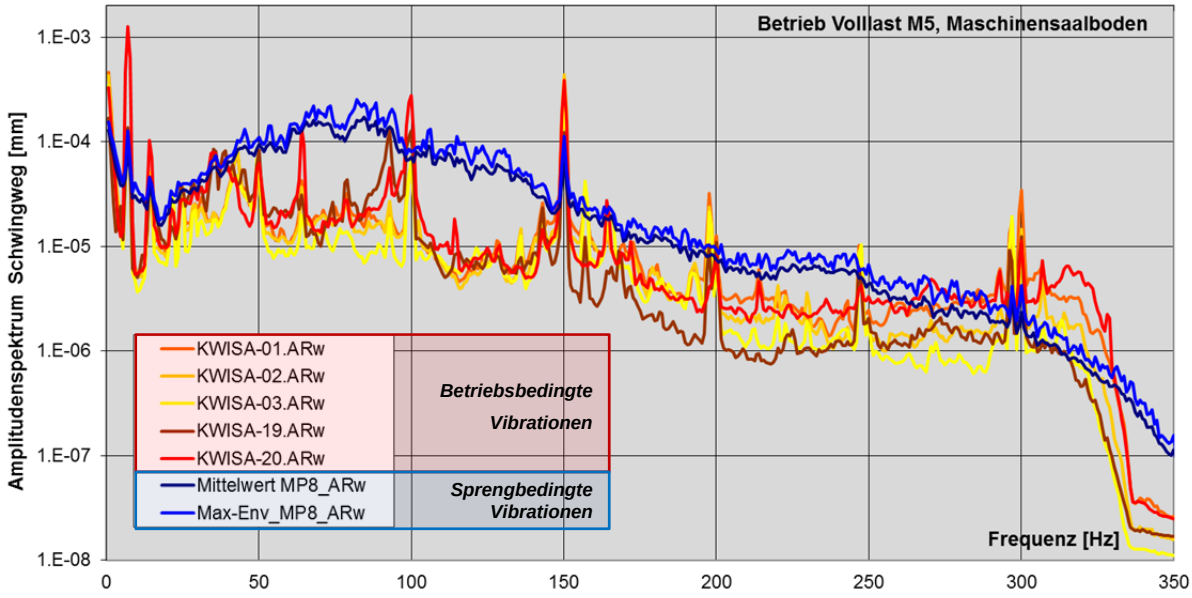

Abb. 11: Amplitudenspektrum des Schwingwegs auf dem Maschinensaalboden, Vergleich der Erschütterungen aus dem stationären Betrieb (Gelb- bzw. Rottönen) und dem Sprengvortrieb (Blautönen).

5 ERFAHRUNGEN UND ERKENNTNISSE

Die bis heute gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse zu gewählten Art und Weise der Begrenzung und Überwachung von sprengbedingten Erschütterungseinwirkungen auf sensible bestehende Anlagen deuten darauf hin, dass die gesteckten Ziele erreicht werden können. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

a) Die Erschütterungseinwirkungen infolge der Sprengarbeiten bewegen sich in der Grössenordnung der Erwartungs- bzw. Prognosewerte,
b) die werkvertraglichen Vereinbarungen für schonendes Sprengen scheinen zu greifen und führen kaum zu Vertragskonflikten und
c) die Auflagen für den Sprengvortrieb führen nicht zu unerwarteten und unerwünschten baubetrieblichen Einschränkungen.

Aus dieser Sicht scheint sich das gewählte Vorgehen zum Umgang mit dynamischen Einwirkungen aus dem Baubetrieb auf bestehende betriebs- bzw. sicherheitsrelevante Anlagen zu bewähren.

Verdankung: Die Autoren danken der Kraftwerk Oberhasli AG (KWO) für die Ermöglichung und Unterstützung der hier vorgestellten Arbeiten sowie für die Erlaubnis, die daraus resultierenden Erkenntnisse zu publizieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Bendat, J.S. & Piersol, A.G. (1986). *Random Data – Analysis and Measurement Procedures*. (2nd Ed.), John Wiley & Sons, New York.

Billeter (2004). Erschütterungsfragen im Bau und Betrieb. Proc. alpTransit Tagung 2004 Interlaken, *SIA Dokumentation D 0202 Bd. 3*, SIA-FGU, pp. 93 - 102.

DIN 4150-3 (1999). Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.

ISO 10'816 (-1, -3 bzw. -5:2000). Mechanical Vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts.

SN 640 312 a (1992). Erschütterungen - Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, VSS

Westine, P.S. (1978). Ground Shock from the Detonation of Buried Explosives. *J. of Terramechanics, Vol. 15/2, pp. 69-79.*