Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 95 (2003)
Heft: 9-10

Artikel: Betonabrasion im Wasserbau
Autor: Jacobs, Frank
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939486

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Betonabrasion im Wasserbau

Frank Jacobs

1. Einleitung

Die durch Verschleiss von Beton im Wasserbau verursachten Kosten sind volkswirtschaftlich bedeutend. Während sieben Jahren führte die TFB mit der VAW der ETH Zürich ein Forschungsprojekt durch, um den Abrasionswiderstand von Beton zu ermitteln und zu verbessern. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Weitere Hinweise sind in [1] enthalten.

Bei der Erosion ist ein Grundkörper (z.B. Betonplatte) im Kontakt mit fliessendem Wasser. Durch das fliessende Wasser findet eine Beanspruchung am Grundkörper statt, d.h. es findet ein mehr oder weniger grosser Materialverschleiss statt. Aufgrund der beteiligten Stoffe (Festkörper, Flüssigkeit, Feststoffe) und der Beanspruchungen (Strömen, Stossen, Schwingen) werden verschiedene Verschleissvorgänge unterschieden (Tabelle 1). Strömt Wasser ohne Feststoffe an einem Festkörper vorbei, wird von einer Flüssigkeitserosion gesprochen. Bei der Abrasion (auch Hydroabrasion bezeichnet) wird der Grundkörper (z.B. die Betonsohle) durch das fliessende Wasser und zusätzlich vom im Wasser mitgeführten Feststoffen (Geschiebe) beansprucht.

Ist der Abrasivstoff weicher als der Grundkörper, d.h. der Verschleiss ist dann meistens gering, spricht man von einer Tieflage und bei umgekehrten Verhältnissen von einer Hochlage des Verschleisses. Bei einer Tieflage kann der Abrasivstoff einem grossen Verschleiss unterliegen. Der Übergang zwischen beiden Lagen wird durch einen Steilanstieg gekennzeichnet. Ist der Werkstoff, wie beispielsweise Beton, aus unterschiedlichen Materialien zusammengesetzt, beeinflussen der Verbund der Materialien und die Textur (räumliche Anordnung der Bestandteile der Materialien) den Abrasionswiderstand. Strömungsbedingte Schwingungen von Bauteilen werden durch Druckschwankungen in der Strömung verursacht. Von bedeutenden Schadensfällen in hydraulischen Systemen infolge dieser Schwingungen wird mehrfach berichtet. Zum Beispiel verursachten diese Schwingungen Ermüdungsbrüche an den Verankerungen der Panzerung von Wehrrücken. Nachfolgend rissen sich die Panzerungen los.

Ein chemischer Angriff bewirkt bei Fluss- und Kraftwerksbauten – im Gegensatz zu Abwasserbauwerken – selten alleine einen bedeutenden Verschleiss. Eine durch einen chemischen Angriff verursachte Auflockerung des Betongefüges beschleunigt jedoch den abrasiven Verschleiss.

In Normen und Regelwerken [2, 3, 4, 5, 6] wird zumeist nur am Rande auf die Verschleissbeständigkeit von Beton eingegangen und nicht zwischen den verschiedenen Arten von Verschleiss (Tabelle 1) unterschieden. Das heisst, es wird zumeist nicht unterschieden, ob hier eine eher schleifende (z.B. Befahrung von Fahrzeugen auf Betonbelägen) oder eine eher prallende (stossende) Beanspruchung (z.B. Verschleiss infolge aufprallenden Wassers, Geschiebe auf Betonbauteil) gemeint ist.

Insgesamt zeigt sich, dass

- Betonabrasion im Wasserbau nur am Rande behandelt wird;
- keine Unterscheidung z. B. aufgrund der Geschiebemenge und -grösse vorgenommen wird;
- teilweise ein minimaler und teilweise ein maximaler Zementgehalt vorgeschrieben wird und
- bei einem zu erwartenden starken Verschleiss eine mittlere Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen von 30 bis 50 N/mm^2 gefordert wird;
- Prüfungen vorgeschlagen werden, die den wesentlichen Verschleissmechanismen im Wasserbau nicht entsprechen.

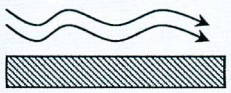
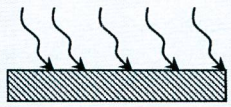
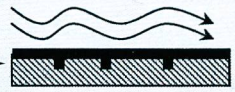
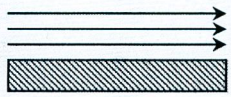
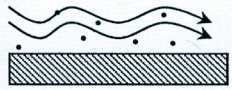
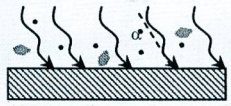
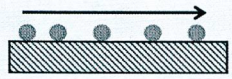
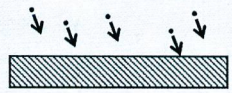
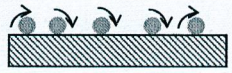
System	Tribologische Beanspruchung		Verschleissart	Beispiel
Festkörper, Flüssigkeit	Strömen		Flüssigkeits-erosion	Kanäle, befestigte Gerinne
	Stossen		Tropfenschlag-erosion	Wasserstrahlen von Oberflächen, Brunnen
	Schwingen Stahlblech verankert		Ermüdungs-bruch	mit Stahlpanzern versehene Wehrkronen
	Stossen durch implodierende Dampfblasen	Geschwindigkeit i.d.R. > 10 m/s 	Kavitation	Überlauf bei Dämmen
Festkörper, Flüssigkeit, Feststoffe	Strömen		(Hydro-)Abrasiv-verschleiss	befestigte Gerinne, Wehre, Tosbecken
	Strömen, Stossen α= Anstrahlwinkel			
Festkörper, Feststoff	Gleiten		Zweikörper-abrasiv-verschleiss	Silos für Feststoffe, Greifer in Bunker, Fahrzeuge an Leitplanken an Strassen
	Stossen			
	Rollen, Wälzen		Roll-, Wälz-verschleiss	Fahrbahnplatten, befahrene Industrieböden

Tabelle 1. Gliederung der Verschleissvorgänge für die Systeme Festkörper/Flüssigkeit/Feststoff nach Uetz (1986) und Höcker (1996) mit Ergänzungen.

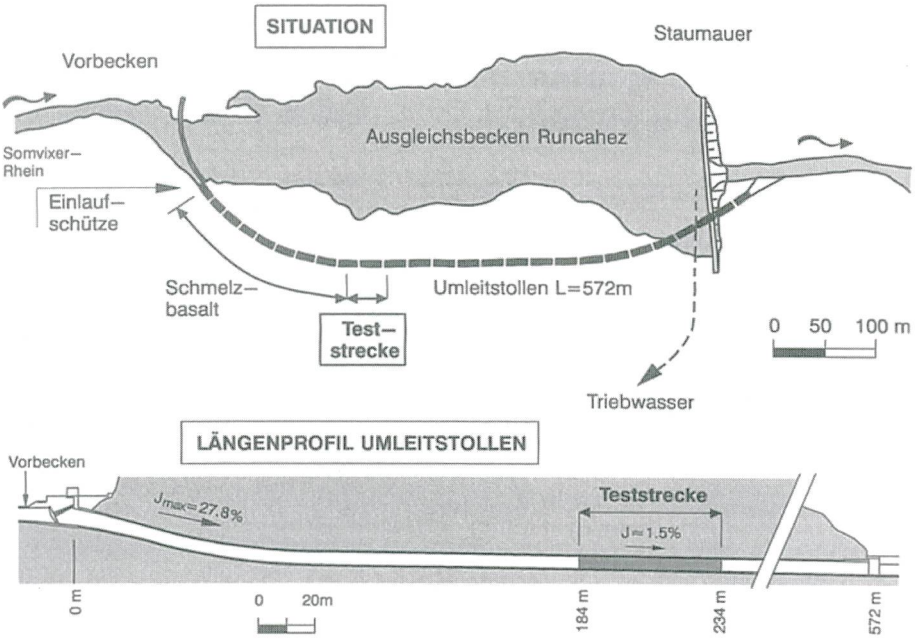


Bild 1. Lage des Umleitstollens, aus Jacobs et al.

2. Stollen Runcahez

2.1 Versuche im Stollen Runcahez

Der Umleitstollen Runcahez liegt in den Alpen in einem Seitental des Rheins und soll bei Hochwasserereignissen ein Staubecken von Geschiebe freihalten. Anfang der 60er-Jahre wurde der Geschiebeumleitstollen erstellt. Schäden an der aus Spezial- und Normalbeton bestehenden Tunnelsohle traten wahrscheinlich bereits wenige Jahre nach der Fertigstellung, sicher ab Ende der 70er-Jahre, auf. Die Schäden wurden fortwährend lokal ausgebessert. Der Schadensfortschritt konnte jedoch nie deutlich reduziert werden. An den Stollenwänden sind kaum Spuren von Verschleiss sichtbar. Nur in den unteren Partien ist die Zementsteinhaut des Betons abradiert worden. Die Normal- und Spezialbetone erreichten nach ca. 30 Jahren Druckfestigkeiten von 60 und 70 N/mm^2.

Während der Versuchsdauer von 1995 bis 1999 passierten gesamthaft ca. 13 Mio. m^3 Wasser und ca. 40 000 t Geschiebe mit einem mittleren Durchmesser (d_{50}) von 16 cm und einem d_{90} von 53 cm während total 60 Stunden den Stollen. Die Lage des Stollens und der Versuchsfelder ist in Bild 1 dargestellt.

Bei der Planung der Arbeiten lagen keine Erfahrungen oder Literaturergebnisse über die Zusammensetzung von Betonen mit einem hohen Abrasionswiderstand unter vergleichbaren Bedingungen vor. Auch konnte die massgebliche Art der Beanspruchung der Werkstoffe im Sohlbereich des Geschiebeumleitstollens nicht genau ermittelt werden; es wurde von einer Kombination aus schleifender und stossender Beanspruchung ausgegangen. Deshalb kamen Betonrezepturen mit einerseits hohen Festigkeiten und andererseits tiefen Elastizitätsmoduln zum Einsatz (Tabellen 1 und 2).

1. Hochfester Silicastaubbeton: hohe Festigkeit, geringes Verformungsvermögen
2. Hochfester Beton: hohe Festigkeit, besseres Verformungsvermögen als 1.
3. Stahlfaserbeton: hohe Festigkeit, ähnliches Verformungsvermögen wie 2.; durch Stahlfasern wird kaum die Rissbildung, jedoch das Risswachstum verringert (hohe Biegezugfestigkeit und hohe Bruchenergie)
4. Walzbeton: mittlere Festigkeit, mittleres Verformungsvermögen, relativ einfacher Einbau auf grossen Flächen
5. Polymerbeton: mittlere Festigkeit, hohes Verformungsvermögen

Die Betone wurden einzeln in durch Stahlprofile abgetrennte Felder eingebracht (Bild 2). Das in Fliessrichtung gesehen erste Feld schliesst direkt an die mit einem Stahlprofil abgeschlossene Auskleidung mit Schmelzbasaltplatten an (Bild 1). Jedes Versuchsfeld war 10 m lang und etwa 3,8 m breit. Bei der Festlegung der Schichtdicke der zu betonierenden Felder bei den Hochleistungsbetonen wurde von einem Verschleiss von Millimetern bis Zentimetern pro Jahr ausgegangen und daher eine Schichtstärke von mindestens 20 cm gewählt. Bis auf das Polymerbetonfeld wurde keine Bewehrung verwendet.

2.1.1 Betoneigenschaften

In den Tabellen 1 und 2 sind die Frisch- und Festbetoneigenschaften der fünf Mischungen angegeben. Die Proben wurden bis zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften unter Wasser gelagert, da im Stollen die Betone ähnlich nachbehandelt wurden. Das Ziel, Betone mit unterschiedlichen Eigenschaften wie Druckfestigkeiten, Elastizitätsmoduln und Bruchenergien herzustellen, wurde erreicht.

2.2 Bestimmung der Abrasionsbeständigkeit

Die Bestimmung der Abrasionsbeständigkeit erfolgte durch eine jährliche Begehung mit Vermessung der Höhe der Testfelder in einem

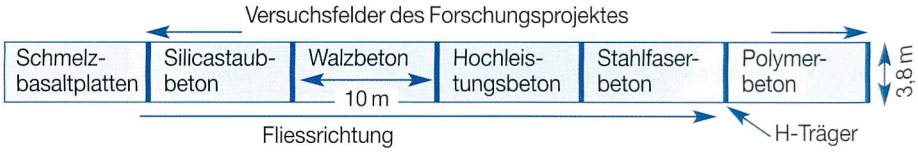


Bild 2. Anordnung der Versuchsfelder auf der Stollensohle.

	Silicastaub-beton	Walz-beton	Hochleis-tungsbeton	Stahlfaser-beton	Polymerbeton	
Zement CEM I 42.5	450	400	500	480	EMACO	1060
Anmachwassergehalt	50	90	90	75	APS T 2040	
Sand 0/4*	563	656	565	559	Sand 1.5/3	250
Basalt 3/15	1505	1452	1432	1405	Kies 4/8	250
					Kies 8/16	1000
HBV Rheobuild 2000	40,5		45	43,2		
VZ Delvo Stab.	2,25		2,5	2,4		
MS-Suspension**	80			28,8		
Stahlfasern 30/0,5				45		
w/z	0,32	0,32	0,30	0,31		
w/(CEM+MS)	0,30			0,30		

* der Sand wies eine durchschnittliche Feuchte von 5,5 Gew.-% auf
** ca. 50 M-% Silicastaub

Tabelle 2. Betonzusammensetzungen in [kg/m^3] der Versuchsfelder.

	Alter [d]	Silica-staub-beton	Hoch-leistungs-beton	Stahl-faser-beton	Walz-beton	Polymer-beton
Würfeldruck-festigkeit [N/mm²]	28 90 700	86 109	77 94 116	96 114 123	56 68	67 68 81
Elastizitäts-modul [kN/mm²]	28 90	54 57	53 58	52 58	50 51	16 13
Biegezug-festigkeit [N/mm²]	28 90 700	12 12	10 10 10	11 12 12	8 9	16 14 11
Bruchenergie [J/m²]	28 90	300 210	240 210	1060 1020	110 210	920 870
Rohdichte [kg/m³]	28 90 700	2674 2683	2683 2655 2677	2737 2726 2726	2564 2568	2366 2360 2488

Tabelle 3. Festbetoneigenschaften der im Stollen Runcahez eingesetzten Betone.

Raster von 50 × 20 cm. Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen auf den Erfahrungen von fünf Betriebsjahren (1995–2000) mit einer im langjährigen Mittel gesamthaft durchschnittlichen Beanspruchung.

- Der gemessene mittlere Verschleiss ist in Bild 3 zu den verschiedenen Messzeitpunkten aufgetragen. Im ersten Betriebsjahr wurde nach einem kurzen Betrieb des Stollens von 2,5 Stunden (Messung 96/1) mit einer geschätzten Wasserfracht von ca. 350000 m³ ein grossflächiges Abschleifen der «Zementhaut» mit einzelnen ausgeschlagenen und/oder abgeschliffenen Stellen beobachtet. Der teilweise ersichtliche «Rückgang» im Verschleiss (z.B. zwischen der Messung 1996 und 1997) beruht auf Messungenauigkeiten. 1996 und 1999 war im Allgemeinen der Verschleiss am grössten. 1996 war dies, wie oben erwähnt, eher ein grossflächiger Verschleiss. Dieses grossflächige Abschleifen verlangsamte sich in den nächsten Jahren. Gesamthaft lag der mittlere (grossflächige) Verschleiss im Bereich von 0,5 bis 1 mm/Jahr. Im Walzbetonfeld ist der grossflächige (nicht mittlere) Verschleiss ähnlich. Im Mittel liegt er beträchtlich höher wegen des überhöhten Einbaus und einer Rinnenbildung auf einer Feldseite.
- Vor allem in den Jahren 1998 und 1999 traten vermehrt kleinflächige (cm- bis dm-Durchmesser) Abplatzungen auf, und der maximale (lokale) Verschleiss nahm deutlicher zu als der mittlere. Diese Abplatzungen beruhen sowohl auf lokalen Schwachstellen der Betonrandzone beim Einbau als auch auf einem Stossverschleiss durch das transportierte Gefüge. Der kleinflächige Verschleiss betrug im Allgemeinen 3 bis 5 mm pro Jahr. Im Walzbetonfeld liegt der maximale Verschleiss jedoch bei etwa 10 cm pro Jahr.
- Ab dem vierten Betriebsjahr (1998) ist erstmals eine Wellenbildung bei den Betonoberflächen erkennbar. Die Wellen weisen eine Wellenlänge von etwa einem halben bis ganzen Meter und Amplituden von maximal einigen Millimetern auf.
- Alle Felder werden vermehrt auf der linken Seite beansprucht, da hier ein verstärkter Geschiebetransport (Ausgang der Kurve) stattfindet.
- Das in Strömungsrichtung liegende erste Feld weist einen stärkeren grossflächigen Verschleiss und eine eher glattere Oberfläche als die nachfolgenden Felder auf. Neben den Unterschieden in den Betonrezepturen beruht dies möglicherweise auf einer höheren abrasiven Belastung im Vergleich zu den anderen Feldern.
- Der überhöhte Einbau des Walzbetons, ausgebildet in Form einer Rampe, führte zu ungünstigen hydraulischen Bedingungen und einem verstärkten Verschleiss. Das Walzbetonfeld zeigt aufgrund der Verdichtungsart die raueste Oberfläche und auch am meisten kleine Schäden wie Abplatzungen sowie Kalkfahnen bei Rissen.
- Die geodätischen Aufnahmen erwiesen sich als zweckmässig zur Beurteilung des Verschleisses der Betone. Jedoch zeigten sich Abweichungen zu den Beobachtungen, vor allem beim Polymerbetonfeld. Bei diesem wurde aufgrund der Begehung der Verschleiss auf etwa 2–3 mm geschätzt. Diese Unterschiede beruhen teilweise auf Messungenauigkeiten.
- Quer zur Strömungsrichtung und senkrecht zur Betonoberfläche verlaufende Risse wirkten sich nicht nachteilig auf den Abrasionswiderstand aus. Die in Fliessrichtung leicht geneigte Arbeitsfuge im Polymerbetonfeld wies im fünften Betriebsjahr erstmals deutlich ausgeschlagene Flanken auf. Zukünftig muss sich zeigen, ob sich diese unsachgemäss ausgeführte Arbeitsfuge als Schwachstelle erweist.
- An den Stahlträgern zwischen den Testfeldern sind keine grösseren Schäden, sondern nur Kratzer sichtbar.
- An Seitenwänden im Stollen zeigte sich keine vermehrte Abrasion während der Versuchsdauer, obwohl die Sohle nicht mehr konkav, sondern horizontal ausgebildet wurde.
- In Bild 4 sind die Bruchenergie und die Biegezugfestigkeit gegenüber dem Verschleiss aufgetragen. Mit zunehmender Biegezugfestigkeit und Bruchenergie nimmt der Verschleiss tendenziell ab. Der Hochleistungsbeton fällt aus dieser Tendenz heraus. Möglicherweise könnte dies

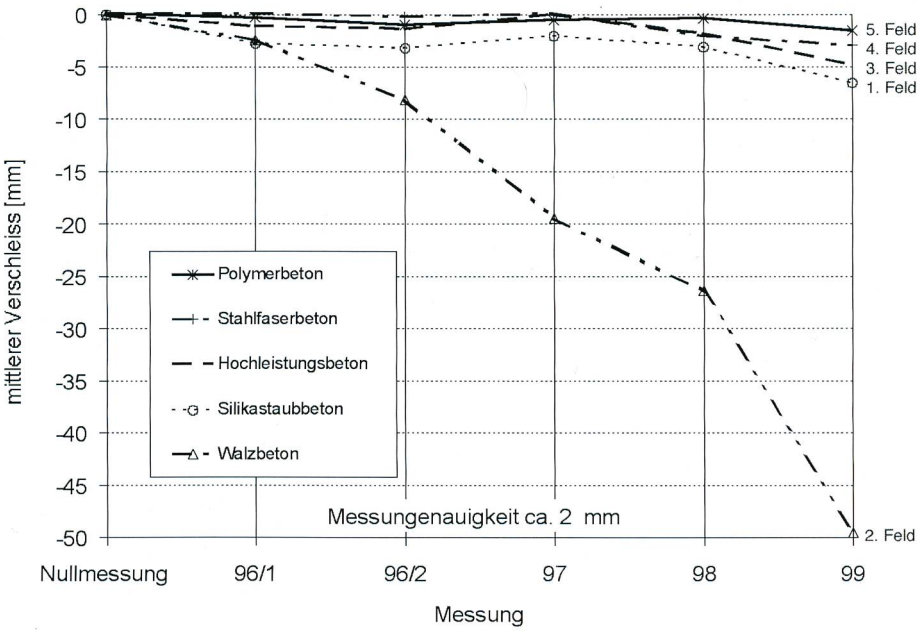


Bild 3. Gemessener mittlerer Verschleiss der fünf Versuchsfelder.

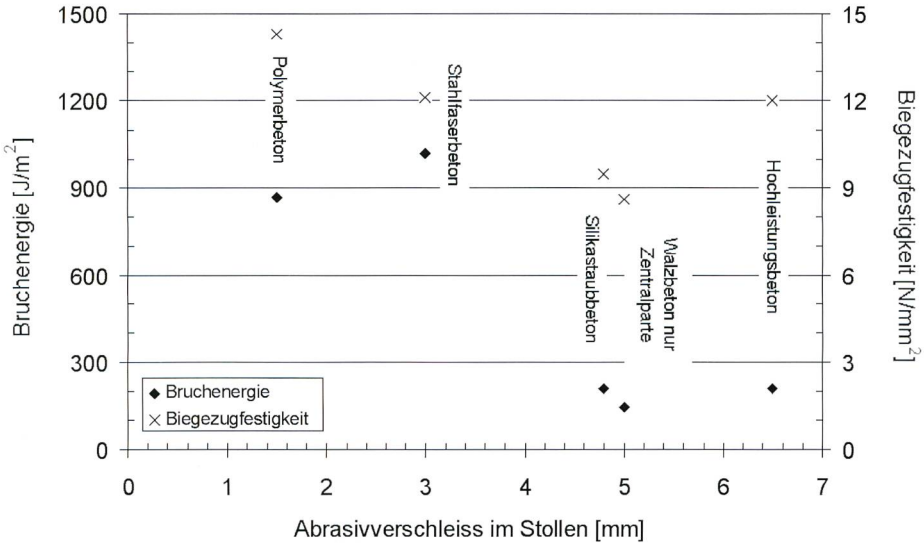


Bild 4. Im Stollen nach fünfjähriger Betriebsdauer gemessener Verschleiss in Abhängigkeit von den nach 90 Tagen gemessenen Bruchenergien und Biegezugfestigkeiten.

auf eine höhere abrasive Belastung des ersten Feldes im Vergleich zu den anderen hinweisen. Zwischen dem Verschleiss und der Druckfestigkeit oder dem Elastizitätsmodul zeigten sich keine Zusammenhänge.

- Die bisher aufgetretenen Abplatzungen und Schleifspuren deuten darauf hin, dass die Härte und die Duktilität der eingesetzten Betone für diesen Anwendungsbereich zweckmässig sind.

Für eine abschliessende Bewertung der einzelnen Betonrezepturen sind sowohl die Schäden absolut als auch die Unterschiede zu gering. Bisher wurde vor allem der äusserste Rand des Betons abgetragen. Es zeigte sich auch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Betoneigenschaften und dem Verschleissverhalten. Es lässt sich vermuten, dass eine hohe Bruchenergie und Biegezugfestigkeit für einen hohen Abrasionswiderstand bei den hier vorliegenden Bedingungen von Vorteil ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für einen Beton, der einem hohen abrasiven Verschleiss wie im Stollen Runcahez unterliegt

- ein guter Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag wichtig ist;
- eine hohe Betonqualität über den gesamten Querschnitt zu gewährleisten ist;
- eine hohe Biegezugfestigkeit und eine hohe Bruchenergie vorteilhaft ist;
- ein tiefer Elastizitätsmodul vorteilhaft sein kann, aber keine Gewähr bietet;
- ein geringer Schleifverschleiss nach Böhme von Vorteil ist, aber keine Gewähr bietet.

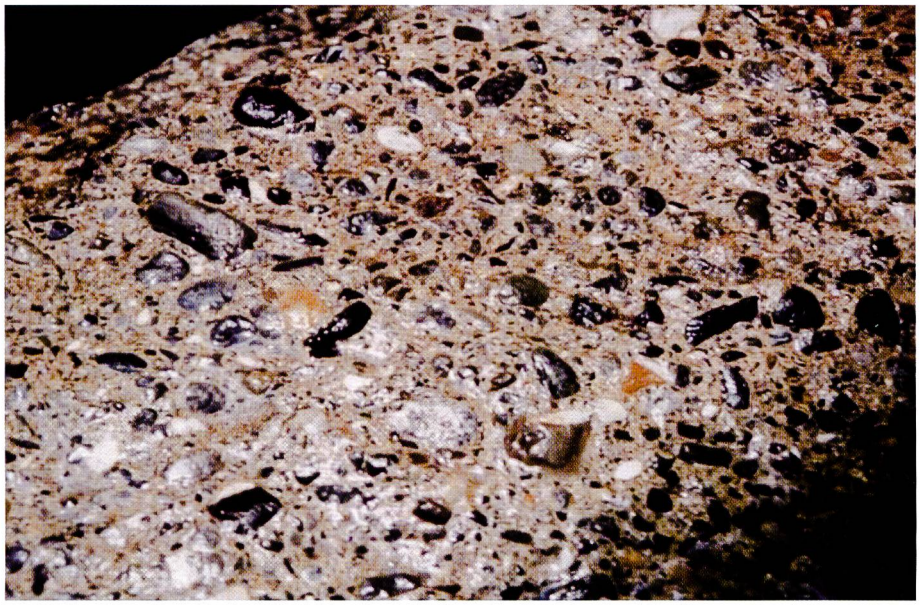


Bild 5. Oberflächlicher Verschleiss («Waschbeton») an Beton mit einem Grösstkorn von 32 mm an einer Wehrkrone.

3. Betone mit geeignetem Abrasionswiderstand

3.1 Anforderungen aufgrund des Abrasionswiderstandes

In Rahmen des Forschungsprojektes wurde zusätzlich ein umfangreiches Literaturstudium vorgenommen und mehrere Dutzend abrasiv belastete Bauwerke wurden inspiziert. In der Regel lagen nur wenige Angaben über die Beanspruchung (Wasser-, Geschiebeführung) des Betons, die Eigenschaften des Betons und die daraus entstandenen Schäden vor. Jedes Bauwerk und zusätzlich zum Teil diverse Bauteile eines Bauwerks können sich in Hinblick auf die Belastung und die Betonqualität unterscheiden. Neben der Betonzusammensetzung beeinflussen die Verdichtung, eine Oberflächenbehandlung und die Nachbehandlung des Betons den Verschleiss.

Mit Bezug auf die grossflächige (nicht lokale) Verschleissrate werden folgende Bauwerkstypen bzw. dort typisch auftretende Schadensfälle unterschieden:

- Flussbauwerke
- Wildbachverbauungen
- Geschiebeumleitstollen, Grundablässe, Tosbecken

In dieser Reihenfolge nehmen im Allgemeinen die Fliessgeschwindigkeit sowie die Menge an Geschiebe und dessen Grösse zu.

Zusätzlich zu diesen drei Klassen ist eine weitere Klasse von Bedeutung:

- Wasserfassungen

Diese Klasse unterscheidet sich von den drei oben genannten Klassen, indem die Fliessgeschwindigkeit an den kritischen Bauteilen höher und die Geschiebegrösse deutlich kleiner als bei Geschiebeumleitstollen ist. Der Anstrahlwinkel des Wasser-Feststoff-Gemisches auf die Werkstoffoberfläche dominiert den Verschleiss.

Die Untersuchung von Natursteinen in hydraulischen Systemen verdeutlicht, dass u.a. die abrasiven Eigenschaften einer natürlichen Streuung unterliegen. Natursteine (z.B. Granite) können zum Teil eine schlechtere Abrasionsbeständigkeit als Beton aufweisen. Dies hängt stark von der Art des Natursteins ab. Harte, spröde Pflasterungen (z.B. mit Schmelzbasaltplatten) erweisen sich bei überwiegend schleifender Beanspruchung als abrasionsbeständiger, sofern ein ausreichender Verbund zum Untergrund gewährleistet ist; bei stossender Beanspruchung sind spröde Pflasterungen weniger abrasionsbeständig als Beton.

Eine quantitative Aussage über die abrasive Belastung ist beim heutigen Stand des Wissens nicht möglich. Anhand einiger

Bild 6. Mit Stahlblechen und Hochleistungsbeton instand gesetztes Tosbecken; die Schäden traten infolge ungünstiger Strömungsbedingungen auf; das Wasser zirkuliert mit relativ hoher Geschwindigkeit im Tosbecken, wobei die maximale Geschiebegrösse nur wenige Zentimeter beträgt.

Bild 7. Muldenförmige Abrasion auf einem Wehrrücken.

Parameter kann aber die Belastung eines Bauteils abgeschätzt werden. In der Regel genügt dazu die Kenntnis der Grössenordnung hydraulischer und hydrologischer Parameter. Es ist auch zu prüfen, ob die Ursache oder das Ausmass der abrasiven Belastung (Fliessgeschwindigkeit, Geschiebemenge und -grösse, Aufprallwinkel usw.) reduziert werden kann.

Je härter der Werkstoff ist, desto besser ist sein Widerstand gegen eine schleifende Beanspruchung. Treten bei feinem Geschiebe und niedrigen Fliessgeschwindigkeiten grössere Abrasionsbelastungen auf, so wird vorteilhaft ein harter Abrasionsschutz verwendet. Bei grösserem Geschiebe, höheren Wassergeschwindigkeiten oder an Orten, wo das Geschiebe aufprallt, hat die Belastung auf das Bauteil stets auch eine schlagende Komponente (Prallverschleiss). Bei zu harten Materialien können dabei Sprödbrüche auftreten.

3.1.1 Flussbauwerke

Ein gut eingebrachter und ausreichend nachbehandelter Beton mit einer mittlerer 28-Tage-Druckfestigkeit von 40 N/mm^2 widersteht in Flussbauwerken, in Wehren und Schwellen im Allgemeinen Fliessgeschwindigkeiten bis 6 m/s mit üblicher (geringer) Geschiebeführung und auch zum Teil bei Hochwässern mit mehr und grösserem Geschiebe mit maximalen Durchmessern von 10 bis 20 cm. In Österreich wird dieser als Beton Höchstwertbeton bezeichnet und für diese Einsatzgebiete empfohlen. Die Zementhaut des Betons und der Feinmörtel zwischen den grossen Zuschlägen wird im Laufe der Jahre durch eine schleifende und stossende Beanspruchung sowie Frostbeanspruchung abgetragen, die grossen Zuschläge ragen dadurch hervor (Bild 5). Der Verschleiss bleibt auf den Randbeton beschränkt und liegt im Allgemeinen im Mittel bei maximal etwa 1 mm pro Jahr.

Beton mit einer mittleren 28-Tage-Druckfestigkeit von 35 N/mm^2 widersteht hier ebenfalls ausreichend lange der normalen Beanspruchung. Bei grösseren Hochwässern können jedoch deutliche Schäden auftreten. Bei sehr ungünstigen strömungsmechanischen Bedingungen (z.B. Fischtreppen, Tosbecken) treten ebenfalls verstärkt Schäden auf (Bild 6).

3.1.2 Wildbachverbauungen

In Wildbächen unterliegen die Sperren im Allgemeinen einem grösseren Verschleiss als bei Flussbauwerken. Durch den Einsatz von hochwertigen Betonen mit Stahl bzw. Natursteinen als Kantenschutz kann der Verschleiss meistens auf im Mittel wenige Millimeter pro Jahr beschränkt werden. Der Verschleiss wird vor allem durch wenige grössere Hochwasserereignisse im Jahr verursacht.

Als hochwertige Betone werden u.a. Stahlfaserbetone, silicastaubhaltige Betone und Polymer(vergütete)-Betone eingesetzt. Zusätzlich wurde die Oberfläche zum Teil durch das Einarbeiten von hartem Zuschlagsmaterial (u.a. Brechsand, Siliciumkarbid) vergütet. Zwischen den Kanteneisen findet eine muldenförmige Abrasion statt (Bild 7), die auf einen geringeren Abriebwiderstand des Betons im Vergleich zum Stahl hinweist. Ohne Kanteneisen ist somit mit deutlich grösseren Abrasionsraten bei den hier eingesetzten Betonen zu rechnen. Das Schadensbild (Herausarbeiten der Zuschläge) entspricht in etwa dem des Betons von Wehren in Flussbauwerken. Bei starker Geschiebeführung werden die Zuschläge abgeschliffen, d.h., die Betonoberfläche ist nur leicht gewellt. Der Verschleiss erfolgt durch eine schleifende und stossende Beanspruchung.

Manche Wildbachsperren stellen einen Extremfall einer Beanspruchung mit sehr hohen Verschleissraten (bis cm/Jahr) am Beton durch grosses Geschiebe (∅ bis 1 m) dar. Durch grosses Geschiebe, das nur während kurzer Perioden transportiert wird, wird der Beton grossflächig abgeschliffen, die Zuschläge ragen kaum heraus. Als Kantenschutz fungieren teilweise Granitsteine, die einen Verschleiss von wenigen Millimetern pro Jahr aufweisen. Die Kombination aus grossflächiger Verschleisssrate und geringer linienförmiger Abrasion in z.B. den Fugen deutet auf eine relativ geringe Geschiebeführung im Sand-Kies-Bereich und eine dominante im dm-Bereich hin. Einer ähnlich starken Abrasion unterliegen der Beton und die Natursteine in geraden Gerinnen mit wenigen grossen Geschiebestössen bei Hochwasser. Der Beton wird linienförmig abgetragen (Bild 8). Bei einem Wehrrücken wurde ein Abschleifen von Schmelzbasalt vorgefunden (Bild 8). Ursache hiefür ist die hohe Fliessgeschwindigkeit des Wassers und viel Geschiebe in mm-Grösse.

In der Regel widerstehen hochwertige Betone mit einer mittlerer 28-Tage-Druckfestigkeit von 40 bis 50 N/mm^2 den Beanspruchungen in Wildbächen. Bei extremen Beanspruchungen wurde der zu geringe Verschleisswiderstand der eingesetzten Betone deutlich.

3.1.3 Geschiebeumleitstollen, Grundablass, Tosbecken

In Geschiebeumleitstollen und Grundabläßen tritt bei den wenigen und kurzen Beanspruchungsdauern ein grosser Verschleiss durch prallende und schleifende Beanspruchung auf. Die Verschleissrate kann hier im Bereich von Zentimetern pro Stunde liegen. Es wird Beton mit 28-Tage-Druckfestigkeiten zwischen 50 und 80 N/mm^2 eingesetzt. Im Geschiebeumleitstollen einer speziellen Stauanlage unterliegt Beton mit einer Würfeldruckfestigkeit von etwa 70 N/mm^2 dennoch einem so starkem Verschleiss, dass jeweils

Bild 8. Linienförmige Abrasion in einem Gerinne mit Betonsohle (links) sowie abgeschliffener Schmelzbasalt (rechts).

innerhalb weniger Jahre nach Instandsetzungen erneut Reparaturen notwendig sind und teilweise Stahlpanzerungen eingesetzt werden.

Durch grosses Geschiebe werden in grossen Teilen von Stollen der Zuschlag und die Matrix des Betons gleichmässig oder ungleichmässig abgeschliffen (Bild 9). Vereinzelte Abplatzungen durch stossende Beanspruchungen sind ebenfalls zu verzeichnen. Je nach Bauwerk und Belastung kann das Schleifen und/oder Prallen des Geschiebes die Hauptschadenursache sein. Der Verschleiss ist meistens auf die Sohle und, in einem geringeren Mass, auf die untersten Dezimeter der Wände begrenzt (Bild 9). Das für die Abrasion massgebliche Geschiebe wird also nur wenig durch die Strömung emporgehoben und an die Wände geschleudert.

Durch fortschreitende Abrasion entstehen aus lokalen Schädigungen lang gezogene Rinnen. Diese können mehrere Meter Tiefe erreichen.

Die Art der Beanspruchung ist sorgfältig zu studieren, um z.B. eine prallende Beanspruchung bei einem spröden Werkstoff wie Schmelzbasaltplatten zu vermeiden. Werden einzelne Platten herausgeschlagen, führt diese zunächst lokale Schädigung mit der Zeit zu einem immer weiter ausgedehnten Schaden. Die in Fliessrichtung hinter der herausgeschlagenen Platte liegenden Platten werden ebenfalls herausgeschlagen. Bei diesen weiteren Platten bestimmt die Verbundfestigkeit zum Untergrund den Abrasionswiderstand und nicht die Platten selber.

3.1.4 Wasserfassungen im Gebirge

Prallstrahlverschleiss wurde bei verschiedenen Wasserfassungen deutlich. Beispielsweise bei einem Tirolerwehr, bei dem die Wasserentnahme über einen Gitterrost am Gerinneboden erfolgt. Das einströmende Wasser prallt zusammen mit Geschiebe bis etwa 2 cm Grösse unter einem stumpfen Winkel auf den Beton und führt so zu beträchtlichen Schäden.

Die deutlich sichtbare linienförmige Abrasion im Gneiss bei einer Wasserfassung (Bild 10) wird auf die kombinierte Wirkung von Wasser mit Sand und Kies sowie auf eine hohe Geschwindigkeit zurückgeführt.

3.2 Weitere Anforderungen

Die Wahl des Werkstoffs wird nicht nur von der einwirkenden Abrasionsbelastung, sondern zusätzlich von weiteren Belastungen, den Möglichkeiten bei Bau und Unterhalt usw. beeinflusst. Es sind u.a. folgende Punkte zu bedenken:

- Drückendes Wasser bzw. fortwährende Wasserzufuhr kann zu Verbundproblemen beim Einbau führen und den Einbau mancher Werkstoffe stark erschweren bzw. unmöglich machen.
- Weitere Belastungen: chemischer Angriff, Frostwechsel, Bergwasserdruck, Temperaturgradienten usw.;
- gewünschter Baufortschritt;
- gewünschte, zulässige Bauteildicke;
- Wärmeentwicklung des Betons;
- Form des Bauwerks: Mit Beton sind gewisse Formgebungen einfacher möglich als mit Holz, Stahl oder anderen Werkstoffen.
- Zugänglichkeit beim Bau: Jahreszeit, Einsatz von Orts- oder Transportbeton, Verfügbarkeit von Betonausgangsstoffen, Transportdauer;
- Zugänglichkeit während des Betriebs der Anlage;
- Reparaturmöglichkeit: jederzeit oder nur zu bestimmten (Jahres-)Zeiten;
- Einschränkung in der Wahl der Werkstoffe aus anderen Gründen wie z.B. Ästhetik;
- geplante Nutzungsdauer mit und ohne Instandsetzung;
- Gefahrenpotenzial bei plötzlichem Auftreten grösserer Abrasionsschäden.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann zur Abrasionsgefährdung von und zur Verringerung des Verschleisses an Bauteilen Folgendes ausgesagt werden:

Bild 9. Schleifend und stossend beanspruchter Betonboden in einem Geschiebeumleitstollen mit wenig Schäden an den Wänden.

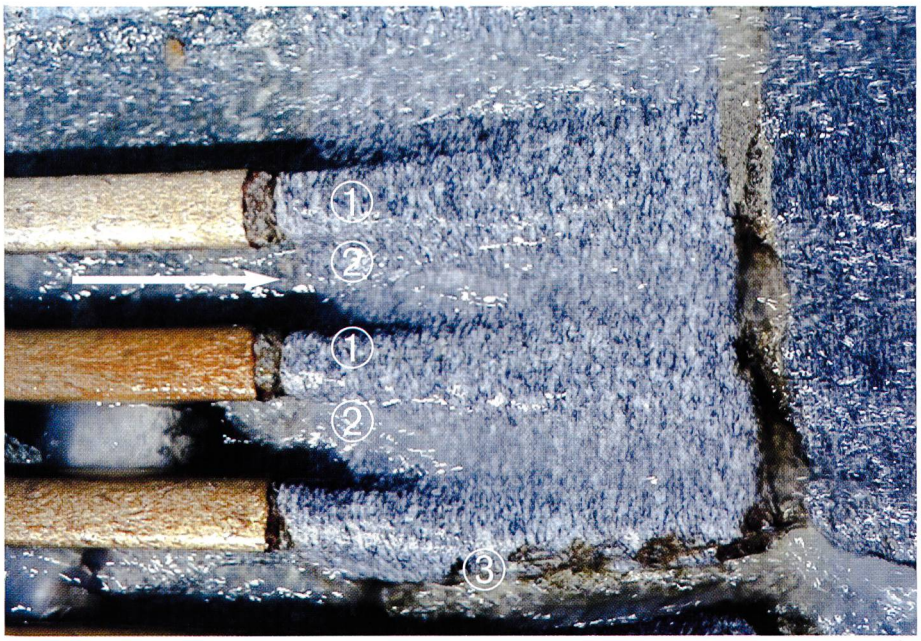


Bild 10. Abrasion von Naturstein durch Wasser hoher Fliessgeschwindigkeit und Geschiebe mit kleinem Durchmesser; im Strömungsschatten der Eisenbahnschienen ① ist die Abrasion geringer als dazwischen ②; in Strömungsrichtung unterhalb der Mörtelfugen ③ wird der Naturstein abradiert.

- Im Allgemeinen steigt mit zunehmender Fliessgeschwindigkeit die Transportkapazität für Geschiebe (Menge, Grösse). Mit zunehmender Geschiebemenge und vor allem Geschiebegrösse nimmt der Verschleiss zu. Trifft die Strömung in einem stumpfen Winkel auf die Oberfläche, ist der Verschleiss grösser als bei oberflächenparalleler Strömung.
- Um die Abrasionsgefährdung eines Bauwerkes oder eines Bauteils abzuschätzen, sind ähnlich exponierte Bauwerke oder Bauteile am gleichen Gewässer oder an vergleichbaren Gewässern zu begutachten. Hat sich bei den bestehenden Bauwerken ein Konzept bewährt, ist die Übernahme dieses Konzepts auf das neue Bauwerk oder Bauteil zu prüfen.
- Aufgrund der Erfahrungen im Rahmen des Forschungsprojektes ergaben sich die in Bild 11 aufgeführten Empfehlungen.
- Die Auswahl eines Werkstoffs muss auf die zu erwartende Belastung abgestimmt werden. Das Potenzial zementgebundener Werkstoffe ist bisher noch nicht ausgeschöpft und sieht aufgrund der durchgeführten Versuche mit Hochleistungsbetonen viel versprechend aus. Da der Verschleiss immer von der Betonoberfläche her stattfindet, ist eine hohe Qualität der Betonrandzone erforderlich. Dabei sind die Verdichtung des Betons und die Nachbehandlung von besonderer Bedeutung. Hinweise zur Vorbereitung des Untergrundes, für den Einbau und die Nachbehandlung des Betons werden in [1] gegeben.
- Der Schädigungsmechanismus bei Abrasion ist sehr komplex und nicht genau bekannt. Deshalb ist, vor allem bei dm-grossem Geschiebe, das Abrasionsverhalten von Werkstoffen im Labor kaum mit vertretbarem Aufwand nachzustellen, da das reale Geschiebe zu verwenden wäre. Normen oder andere Regelwerke geben nur sehr allgemeine Informationen zur Abrasionsgefährdung bzw. zu den notwendigen Betonqualitäten.
- Geeignete Abrasionsversuche im Labor [7, 8, 9] und die Untersuchung der Betoneigenschaften können erste Anhaltspunkte zum Abrasionswiderstand von Beton geben. Die Biegezugfestigkeit und die Bruchenergie beeinflussen den Abrasionswiderstand deutlicher als die Druckfestigkeit.

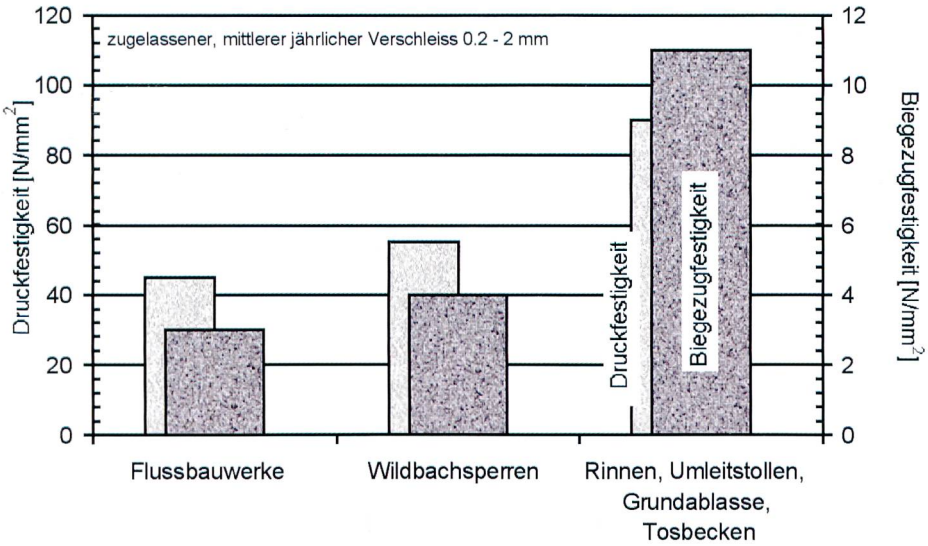


Bild 11. Allgemeine Empfehlungen zu notwendigen Betonfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Art des Bauteils.

Literatur

[1] *Jacobs, F., Winkler, K., Hunkeler, F., Volkart, P.* (2001): Betonabrasion im Wasserbau: Grundlagen – Feldversuche – Empfehlungen. Mitteilungen VAW der ETHZ, 168, 162 S.

[2] Norm SIA 162 (1993): Betonbauten.

[3] ASTRA/BAV/BWW/SBB (1998): «Sicherheit von Bauwerken im Wasser: Empfehlungen für die Überwachung und Hinweise für den Neubau». – Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bundesamt für Verkehr (BAV), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Schweizerische Bundesbahnen (SBB).

[4] DIN 1045-2 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.

[5] BMV (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserkraftwerken (Leistungsbereich 219).

[6] ÖNORM B4710-1.

[7] *Liu, T.* C. (1981): Abrasion resistance of concrete. J. ACI 78, 341–350.

[8] *Huber, H. & Rozinski, F.* (1977): Durotec-Gf-Ep-Platten als Schutzverkleidung für abrasions- und kavitationsbeanspruchte Bauteile. – Energiewirtschaft, Wien, 37–44.

[9] *Haroske, G., Vala, J., Diedrichs, U.* (2000): Beton und Mörtel für die Instandsetzung verschleissgeschädigter Betonbauteile im Wasserbau. DAfStb, H. 511.

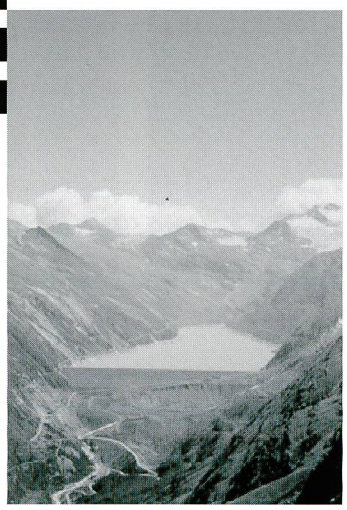
Anschrift des Verfassers

Dr. *Frank Jacobs*, TFB Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, Lindenstrasse 10, CH-5103 Wildegg.

Meteodat und Energie

Als Spin-off Firma der ETH Zürich mit langjähriger Erfahrung im Energiebereich erarbeiten wir für Ihr Unternehmen auch massgeschneiderte Lösungen in den folgenden Bereichen:

- Produktionsprognosen
- Verbrauchsprognosen
- Preisprognosen
- Messdaten und Analysen
- Zuflussvorhersagen
- Energie- und Wetterderivate



METEODAT GMBH

Meteodat GmbH
Bereich Energie
Technoparkstr. 1
8005 Zürich
Tel. ++41 01 445 34 20
Fax. ++41 01 445 34 24
email: info@meteodat.ch
www.meteodat.ch

Transport und Versetzen Erdgasleitung, Rohrgewicht 12 Tonnen

Wir lösen Ihr Transportproblem

Wir montieren und betreiben Materialseilbahnen bis 20 Tonnen Nutzlast

Zingrich

Materialseilbahnen
3714 Frutigen

Telefon 033 671 32 48
Fax 033 671 22 48
Natel 079 208 90 54
www.zingrich-seilbahnen.com
MwSt.-Nr. 352 338

ACQUISITION, STORAGE AND VERIFICATION OF STRUCTURE MONITORING MEASURMENTS

cesmon

TALSPERREN

BRÜCKEN

TUNNEL

MAUERN

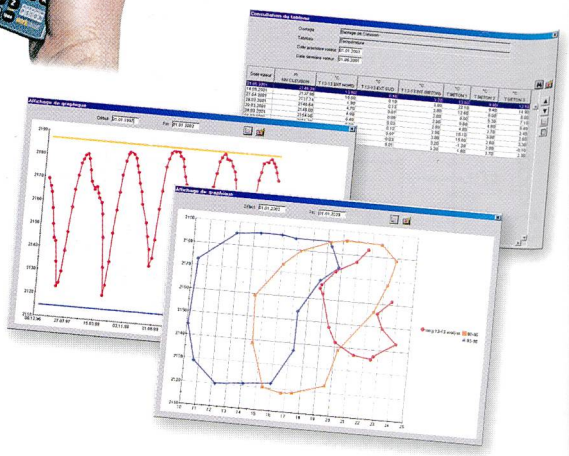
GEBÄUDE

Cesmon erlaubt die Erfassung, die Kontrolle und die Archivierung der Überwachungsdaten der Bauwerke.

Sicherheit im Erfassen der Messungen
- Erfasst auf industriellem Handterminal
- Direkte Kohärenzkontrolle
- Verarbeitung der Messung an der Quelle

Informationsdarstellung und Zugriff
- Optimale Benutzung des EDV-Hilfsmittels
- Mehrsprachige Software für mehrere Anwender
- Darstellung in Form von Tabellen und Graphiken

Betriebssicherheit
- Archivierung aller Änderungen
- Architektur Kunde/Server mit Zugriffskontrolle



www.cesmon.ch info@cesmon.ch

EOS - Place de la Gare 12 - 1001 Lausanne
Tel. +41 (0)21 341 21 11