

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 80 (1988)
Heft: 11-12

Artikel: Auswahlkriterien für hydraulische Maschinen, um Erosion durch Schwebstoffe zu verhindern
Autor: De Leva, Fabrizio
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940760>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

Auswahlkriterien für hydraulische Maschinen, um Erosion durch Schwebstoffe zu verhindern

Fabrizio de Leva

Zusammenfassung

Viele hydraulische Maschinen weisen schwere Erosionsschäden auf, die durch harte Suspensionen, die vom Wasser mitgeführt werden, verursacht sind. Besonders betroffen sind Francisturbinen und Speicherpumpen. Um Erosionsschäden und Unterhaltskosten möglichst klein zu halten, müssen bereits beim Entwurf die richtigen Massnahmen getroffen werden. Die Arbeit zeigt, wie durch richtige Wahl der Maschinencharakteristik starke Erosion vermieden wird.

Resumé: Critères à considérer pour la sélection d'une machine hydraulique afin d'éviter l'érosion due au sable

De nombreuses machines hydrauliques subissent des dégâts importants dus à la présence de matériaux abrasifs en suspension entraînés par l'eau. Les turbines Francis et les pompes d'accumulation sont particulièrement touchées. Des mesures adéquates doivent être prises dès la phase du projet afin de limiter le plus possible les dégâts et les frais d'entretien dus à l'abrasion. L'exposé témoigne comment l'on peut réduire une forte abrasion par un choix judicieux des caractéristiques des machines.

Einführung

Bei zahlreichen Wasserkraftanlagen verursachen im Betriebswasser vorhandene Schwebematerialien ernste Probleme für Betrieb und Unterhalt der Maschinen. Wenn die Materialien aus harten und scharfkantigen Körnern bestehen, beispielsweise aus Quarz, können die Schäden an den hydraulischen Maschinen sehr gross sein, wie das aus Bild 1 ersichtlich ist.

Der Umfang der Schäden sowie Aufwand und Schwierigkeit, diese zu reparieren, sind durch den Typ der Maschine beeinflusst. Turbinen des Typs Francis und Zentrifugalpumpen sind am meisten betroffen, da die drehenden und festen Dichtringe zusätzlich abgenutzt werden, was den Wirkungsgrad der Maschine herabmindert. In diesen Fällen muss neben den Reparaturkosten mit einem Verlust der Energieproduktion gerechnet werden. Die betroffenen Teile dieser Maschinen sind schwer zugänglich, und Reparaturen durch Schweissarbeiten verlangen oft eine komplette Demontage der Gruppen.

Es ist möglich, bereits bei der Projektierung Massnahmen zu treffen, um die Abnutzung bei diesen Maschinen zu vermindern und dadurch den Umfang der Wartungsarbeiten zu reduzieren.

Es sind dies: wirksamen Entsander bei der Wasserfassung anbringen; passende Materialien für die verschiedenen aktiven Teile wählen; Maschinenbauweise, die problemlosen Ausbau und Zusammenbau ermöglicht; Charakteristiken der Maschinen so wählen, dass die Abrasion klein bleibt. Im folgenden wird nur die letztgenannte Massnahme behandelt. Es wird versucht, Projektierungsgrundlagen für Anlagen mit Francisturbinen und Zentrifugalpumpen festzulegen, die zur Verminderung von Abrasion beitragen können.

Mechanismus der Abrasion

In seiner Studie betreffend Abrasion gibt Professor Bove ^[1] eine Formel für die Abrasionsintensität der schwebenden Materialien.

$$P_e = \mu V \frac{\rho_x - \rho_w}{R} G^3$$

P_e = Abrasionsintensität

μ = Reibungskoeffizient zwischen Laufradschaufeln und Körnern

V = Volumen der Körner

ρ_x = spezifisches Gewicht der Körner

ρ_w = spezifisches Gewicht des Wassers

R = Radius der Laufradschaufeln

G = Geschwindigkeit der Körner

Diese Formel zeigt, wie wichtig die Geschwindigkeit der Materialkörner ist, sie wirkt sich mit der dritten Potenz auf die Abrasionsintensität aus.

Von der Maschine aus betrachtet, entspricht die Körnergeschwindigkeit der relativen Wassergeschwindigkeit im Laufrad, wie aus Bild 2 ersichtlich ist.

Die Entsander sind sehr nützliche Einrichtungen, um die Abrasion der hydraulischen Maschinen herabzusetzen. Normalerweise ist es aber nur möglich, Körner mit einem Durchmesser grösser als 0,2 bis 0,1 mm wirksam zu eliminieren. Die kleineren Körner, die immer im Wasser schwebend bleiben, können jedoch, wie bereits öfter festgestellt, grösseren Schaden anrichten.

Als Beispiel sei der Fall der Speicherpumpen Z'Mutt im Wallis erwähnt, bei welchen starke Abnutzung auftritt, obwohl, wie die granulometrische Analyse zeigt (Bild 3), Körner > 0,2 mm Durchmesser nur 3 Prozent der schwebenden Materialien ausmachen.

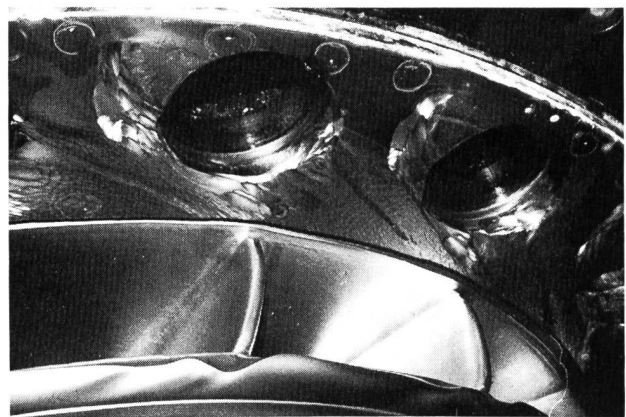


Bild 1. Laufrad und Schutzring einer Francisturbine mit grosserer Abnutzung durch Abrasion.

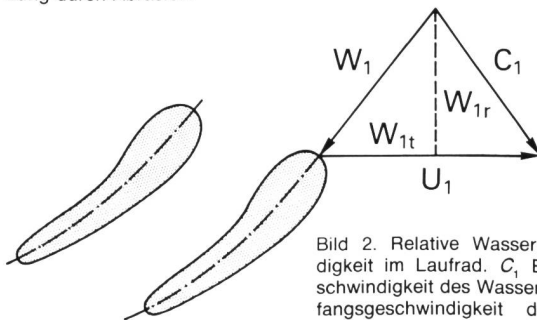


Bild 2. Relative Wassergeschwindigkeit im Laufrad. C_1 Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers, U_1 Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades, W_1 Tangentialkomponente und W_{1r} Radialkomponente der Relativgeschwindigkeiten.

Tabelle 1. Ergebnis der Umfrage über Abrasion von Francisturbinen.

Nr.	Kraftwerk	Maschinentyp	Gefälle [m]	Wasser- menge [m³/s]	Drehzahl [rpm]	Lauf- rad- material	Parameter der Abrasion [g/h]	Relative Wasser- geschwin- digkeit [m/s]
1 T	Grimsel	VS	88	6,5	600	acier inox 13/4	0,06	12,8
2 T	Innertkirchen	VS	225	14	600	acier inox 13/4	0,24	13,3
3 T	Ernen	HD	271	14	1000	M _r – SFG	10,9	17,5
4 T	Martigny Bourg	HD	177	4,9	750	acier inox 18/8	0,5	14,0
5 T	Vallorcine	VS	382	15	600	acier inox 13/4	3,9	20,0
6 T	Sand	VS	154	3,35	750	acier inox 13/4	1,53	14,6

Tabelle 2. Ergebnis der Umfrage über Abrasion von Speicherpumpen.

Nr.	Kraftwerk	Maschinentyp	Gefälle [m]	Wasser- menge [m³/s]	Drehzahl [rpm]	Lauf- rad- material	Parameter der Abrasion [g/h]	Relative Wasser- geschwin- digkeit [m/s]
1 P	Mottec	HS 3	628	3,2	750	acier inox 13/4	0,5	26,1
2 P	Z'Mutt	VS 2	480	5,5	1500	acier inox 13/4	27,0	40,5
3 P	Stafel	HS 1	225	3,2	1500	acier inox 13/1	3,5	34,5
4 P	Ferpècle	HS 1	220	2,8	1500	acier inox 13/1	2,5	36,7
5 P	Arolla	HS 2	315	2,15	1500	acier inox 13/1	6,5	42,3
6 P	Arolla	HD 2	315	4,2	1500	acier inox 13/1	18,0	42,3
7 P	Vallorcine	VS 3	390	9,0	600	acier inox 13/4	0,15	32,2

V = Vertikale Anordnung der Achse
H = Horizontale Anordnung der Achse

S = Einflutig
D = Doppelflutig

Demgegenüber weisen die Speicherpumpen der Zentrale Vallorcine der Kraftwerke Emosson AG nach zahlreichen Betriebsstunden nur Spuren von Abrasion auf, obwohl die Zusammensetzung der schwebenden Materialien ähnlich ist wie diejenige der Zentrale Z'Mutt (siehe Bild 3).

Wassergeschwindigkeit

Um die Grösse der Abrasionsschäden in Abhängigkeit der relativen Wassergeschwindigkeit in den Laufrädern von Francisturbinen und Zentrifugalpumpen deutlich machen zu können, wurden bei mehreren Kraftwerkbesitzern Informationen eingeholt.

Die relative Wassergeschwindigkeit im Laufrad wurde aufgrund der Betriebsdaten und der Maschinenabmessungen ermittelt. Die bei der Revision auf die Laufräder aufgeschweisste Materialmenge dividiert durch die Anzahl Betriebsstunden zwischen zwei Revisionen wird als Abrasionsgrad betrachtet.

Die Resultate der Analyse sind in Tabelle 1 für die Turbinen und in Tabelle 2 für die Pumpen eingetragen. Bild 4 zeigt das Diagramm für die Abrasionsgrade in Funktion der relativen Wassergeschwindigkeit.

Die Methode, die angewandt wurde, ist zwar approximativ, da die Aggressivität und die Menge des schwebenden Materials nicht berücksichtigt wurde. Die Resultate sind jedoch sehr homogen und zeigen klare Verhältnisse zwischen Ab-

rasionsgrad und relativer Geschwindigkeit des Wassers. Es ist festzustellen, dass der Abrasionsgrad sehr rasch ansteigt, sobald die relative Wassergeschwindigkeit 15 m/s bei Francisturbinen und 35 m/s bei Pumpen überschreitet. Die Resultate stimmen mit den theoretischen Studien überein, wonach die Abrasionsintensität proportional zur dritten Potenz der Körnerggeschwindigkeit ist.

Projektierungskriterien für Francisturbinen

Um die Abrasionsschäden bei Francisturbinen in vertretbaren Grenzen zu halten, muss die relative Wassergeschwindigkeit im Laufrad kleiner als 15 m/s sein.

Um dies zu erreichen, muss die Drehzahl der Maschinen bei der Projektierung sorgfältig gewählt werden.

Bild 5 zeigt die relative Wassergeschwindigkeit in Funktion der Drehzahl für eine Turbine mit 200 m Gefälle und 40 m³/s Wassermenge.

Für niedrige Drehzahl wird der Laufraddurchmesser so vergrössert, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades erhöht wird und infolgedessen auch die tangentielle Komponente der relativen Wassergeschwindigkeit (siehe Bild 2). Für hohe Drehzahl wird der Laufraddurchmesser so verkleinert, dass der Durchgangsquerschnitt im Laufrad reduziert wird. Dadurch wird die radiale Komponente der relativen Geschwindigkeit erhöht.

Anhand einer Studie wurde für Francisturbinen der Zusam-

Bild 3, unten. Granulometrische Kurve schwebender Materialien im Betriebswasser der Zentralen Z'Mutt und Vallorcine.

Bild 4, rechts. Resultate der Umfrage zur Ermittlung des Abrasionsgrades in Funktion der relativen Wassergeschwindigkeit im Laufrad von Francis-turbinen und Pumpen. Die Bezeichnungen der Maschinengruppen sind aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich.

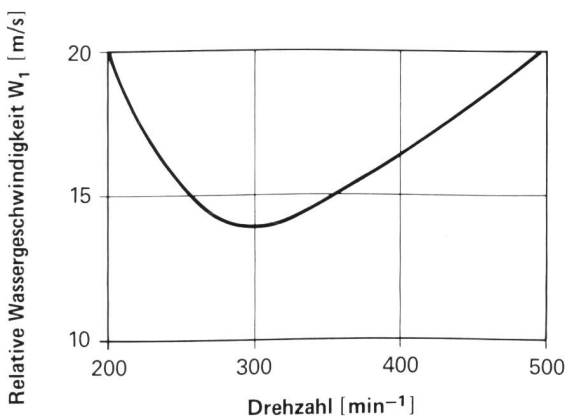
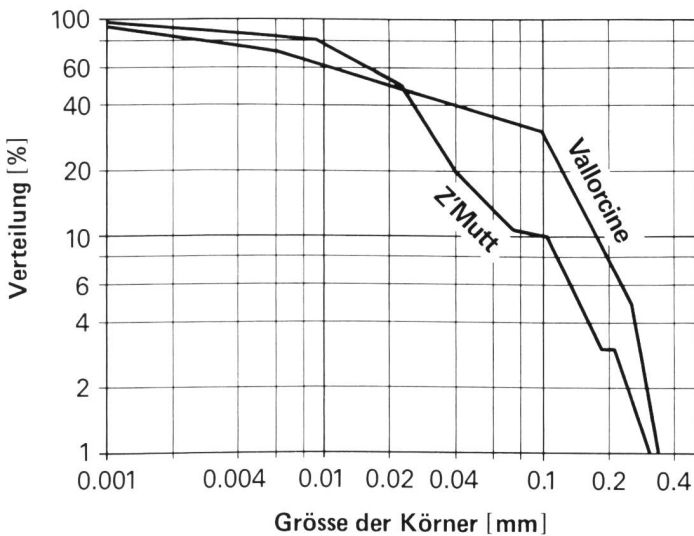
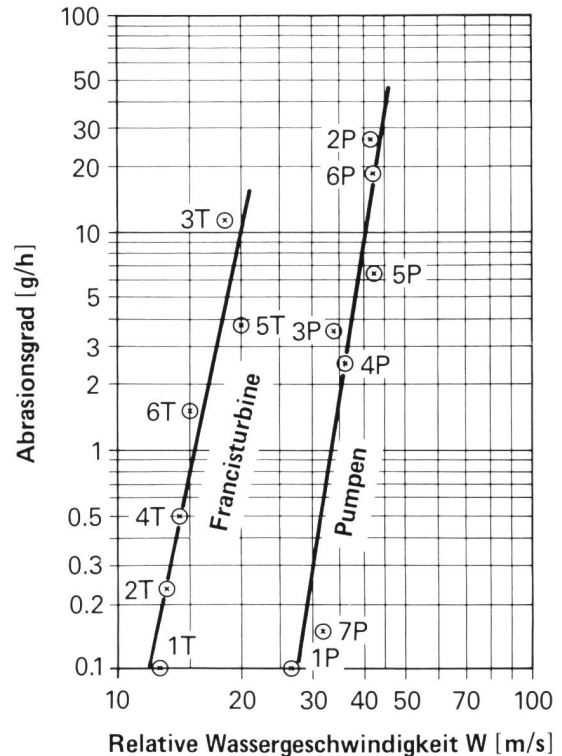
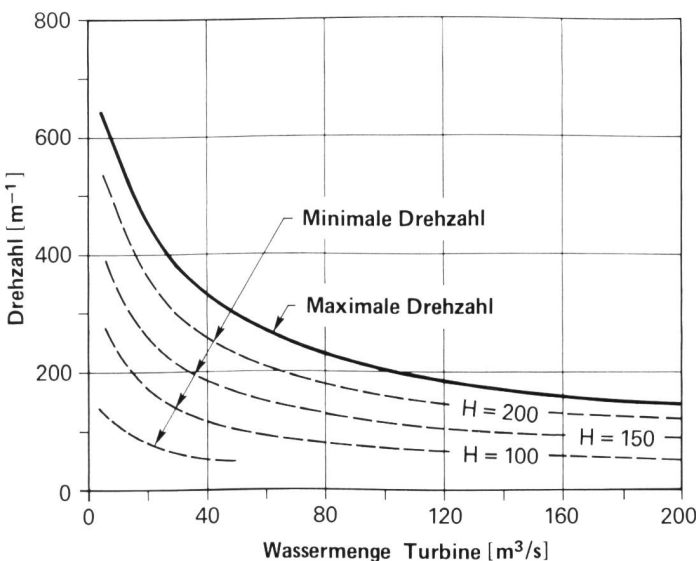


Bild 5. Relative Wassergeschwindigkeit in Funktion der Drehzahl für eine Francis-turbine mit 200 m Fallhöhe und 40 m^3/s Wassermenge.

Bild 6. Maximale und minimale Drehzahl zur Begrenzung der relativen Wassergeschwindigkeit in einer Francis-turbine auf 15 m/s. Drehzahl in Funktion von Gefälle und Wassermenge.



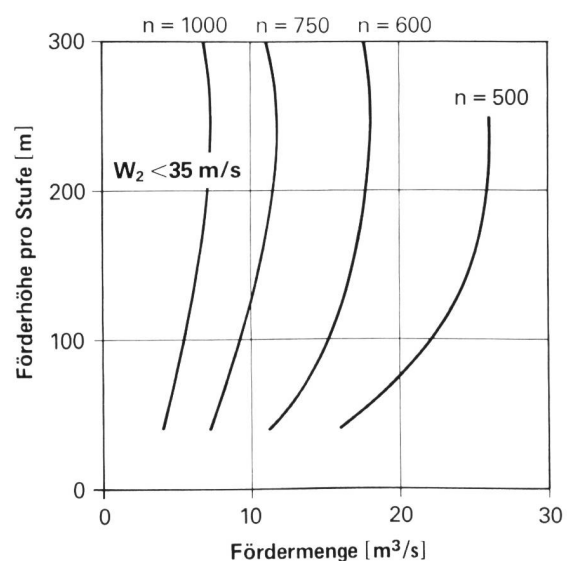
menhang zwischen Drehzahl, Durchflussmenge und Fallhöhe bei Begrenzung der relativen Wassergeschwindigkeit auf 15 m/s ermittelt.

Die Maschinenabmessungen wurden für die verschiedenen Fälle unter Anwendung der statistischen Diagramme [2] ermittelt. Die Resultate sind aus Bild 6 ersichtlich, wobei sich zeigt, dass die maximale Drehzahl nicht vom Gefälle abhängt und nur mit der Wassermenge variiert.

Die minimalen Drehzahlen steigen bei gegebener Wassermenge bedeutend mit dem Gefälle. Für ein Gefälle von über etwa 250 m kann die relative Wassergeschwindigkeit nicht mehr bei 15 m/s begrenzt werden. Es ist zu erwähnen, dass die maximale Drehzahl im allgemeinen mit statistischen Werten übereinstimmt [2].

Für Betriebswasser mit hoher Schwebstoffkonzentration, vor allem bei harten und rauen Körnern, wird empfohlen, eine Drehzahl zu wählen, die ungefähr in der Mitte liegt, das

Bild 7. Maximale Drehzahl einer Pumpe mit auf 35 m/s begrenzter relativer Wassergeschwindigkeit. Die Drehzahl ist in Funktion der Förderhöhe pro Stufe und der Fördermenge dargestellt.



heisst zwischen Maximum und Minimum des auf Bild 6 gezeigten Diagramms. Dadurch bleiben die durch Abrasion verursachten Schäden klein.

Für Gefälle über 250 m ist empfehlenswert, Pelton-turbinen zu installieren.

Projektierungskriterien für Speicherpumpen

Damit Abrasionsschäden an den Pumpen gering bleiben, sollte die relative Wassergeschwindigkeit im Laufrad kleiner als 35 m/s sein.

Eine Studie wurde durchgeführt zur Ermittlung der Drehzahl in Abhängigkeit der Durchflussmenge und der Förderhöhe pro Stufe, bei Begrenzung der relativen Geschwindigkeit des Wassers unterhalb der kritischen Werte. Die Abmessungen der Pumpen sind anhand statistischer Diagramme ermittelt worden.

Die Studie beschränkt sich auf Drehzahlen, wie sie für grosse Speicherpumpen üblich sind. Die Resultate sind aus Bild 7 ersichtlich. Im Bereich links der Kurven konstanter Drehzahlen ist die relative Wassergeschwindigkeit < 35 m/s; sie hat die Tendenz kleiner zu werden, je weiter man sich von den Kurven entfernt.

Bei Drehzahlen über 1000/min ist die relative Wassergeschwindigkeit immer sehr hoch. Für Pumpen, die stark feststoffhaltiges Wasser zu fördern haben, ist aus diesem Grund zu empfehlen, diesen Wert nicht zu überschreiten. Wie aus Bild 7 ersichtlich, hängt die Wahl der Drehzahl direkt von der Fördermenge ab.

Die Förderhöhe pro Stufe beeinflusst die relative Wassergeschwindigkeit nur geringfügig. Dies erklärt sich dadurch, dass, wenn die Stufenförderhöhe reduziert wird, die Umfangsgeschwindigkeit kleiner wird und – bei gleicher Drehzahl – auch der Leitraddurchmesser und infolgedessen auch die tangentielle Komponente der relativen Geschwindigkeit W_t kleiner werden.

Gleichzeitig werden die Laufradquerschnitte reduziert, was zur Konsequenz hat, die radiale Komponente der Geschwindigkeit W_r zu vergrössern. Die beiden Geschwindigkeitsänderungen sind ähnlich, so dass die Resultante praktisch konstant bleibt.

Die Wahl der Drehzahl und der Anzahl Stufen hängen nicht nur von den Kriterien für die Reduzierung der Abrasion ab, sondern auch vom hydraulischen Konzept und von den Kosten.

Bei der Auslegung einer Speicherpumpe ist es nötig, einen Kompromiss zu finden, der die verschiedenen Anforderungen optimal berücksichtigt.

Literatur

[1] Th. Bovet: Contribution à l'étude du phénomène d'érosion par frottement dans le domaine des turbines hydrauliques «Bulletin Technique de la Suisse Romande» 84 (1958) no 3.

[2] F. de Siervo, F. de Leva: Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines «Water, Power and Dam Construction» August 1976.

Adresse des Verfassers: Fabrizio de Leva, dipl. Ing. ETH, Stv. Leiter Sparte Kraftwerke, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, CH-5401 Baden.

Deutsche Fassung des Vortrages vom Internationalen Symposium 1988 in Zürich «Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau», organisiert von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ und vom Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband. Die französische Fassung des Vortrages erscheint in den Tagungsbänden: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 99 und Nr. 100.

Verhalten, Kontrolle und Unterhalt von Talsperrenbeton

Frosteinwirkung und Sinterungen

Werner Studer

Einleitung

Frosteinwirkung und Sinterungen haben beide einen engen Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt eines Betonbauwerks. Allerdings spielt bei der Frosteinwirkung das in den Betonporen ruhende Wasser, bei den Sinterungen hingegen das durch Risse, undichte Arbeitsfugen und Kiesnester fließende Wasser die Hauptrolle. Anders ausgedrückt könnte man die Frosteinwirkung als ein Problem des Betons selbst, die Sinterungen als eines des Betonbauwerks bezeichnen. Da man für das Verständnis beider Erscheinungen die Vorgänge bei der Erhärtung des Zementes und die Betonstruktur wenigstens den Grundzügen nach kennen sollte, wird vorerst ein kurzer Abstecher in diesen Teil der Betontechnologie gemacht, bevor dann zuerst auf die Sinterungen und schliesslich auf die Frosteinwirkungen eingegangen wird.

Erhärtung des Zementes und Betonstruktur

Zement ist ein sogenanntes hydraulisches Bindemittel, das mit Wasser, auch unter Wasser abbindet und im abgebundenen Zustand gegenüber Wasser weitgehend beständig ist. Man könnte den Zement also als Zweikomponentenkleber auffassen, mit dem Zementpulver als «Harz» und dem Wasser als «Härter». Das Gemisch aus Zement und Wasser – und der beim Mischen eingeschlossenen Luft – wird im frischen Zustand denn auch als Zementleim bezeichnet.

Das Abbinden und Erhärten des Zementes ist demnach eine Hydratation, eine Anlagerung von Wasser an die Klinkerminerale (Kalziumsilikate, ~aluminat und ~ferrite).

Es ist ein äusserst komplizierter Vorgang, der zuerst schnell abläuft, dann immer langsamer werdend über Jahre anhält. Dabei bildet sich an den Oberflächen der Zementkörner ein Filz von verschiedenartigen feinsten Kristallen, der etwa das doppelte Volumen des Zementes einnimmt, aus welchem er entsteht, und etwa 28 % Hohlräume enthält.

Dieses sogenannte Zementgel wächst also in die wassergefüllten Zwischenräume im Zementleim hinein und füllt sie mehr und mehr aus.

Als Folge davon

- bindet der Zement ab;
- nimmt die Festigkeit zu;
- werden die groben, gut Wasser leitenden Kapillarporen unterbrochen und die Dichtigkeit nimmt zu;
- steigt der Anteil an Gelporen, in denen das Wasser erst unter -25°C gefriert und die Frostbeständigkeit nimmt zu.

Im erhärteten Zustand heisst der Zementleim dann Zementstein. Neben dem Zementgel aus Kalziumsilikathydrat-Kristallen entstehen bei der Hydratation auch grosse Mengen von Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Im Alter von 10 Jahren und darüber, wenn die Hydratation praktisch abgeschlossen ist, enthält jeder m^3 einer Betonstaumauer etwa 40 bis 70 kg dieses Stoffes (25 Masse % von PC).

Der grösste Teil davon ist als Kristalle in den Zementstein eingelagert, der Rest ist im Porenwasser gelöst. Bei einer Dichte von 2200 bis 2400 kg/m^3 nimmt das $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ungefähr 1,5 bis 3 % des Betonvolumens ein und trägt nur unwesentlich zur Festigkeit des Betons bei.

Andererseits hat sich aber gezeigt [1], dass das Zementgel