

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Barjenbruch, Ulrich

Wärmehaushalt von Kanälen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102723>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Barjenbruch, Ulrich (1998): Wärmehaushalt von Kanälen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 79. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 7-12.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Wärmehaushalt von Kanälen

DR. HABIL. ULRICH BARJENBRUCH, BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, KOBLENZ

Durch die kalten Winter der letzten Jahre hat die Akzeptanz der Bundeswasserstraßen infolge längerer eisbedingter Schifffahrtssperren merklich abgenommen. Dieser Entwicklung möchte die Bundeswasserstraßenverwaltung entgegenwirken. Geeignete Maßnahmen sollen die eisbedingten Sperrzeiten verkürzen, wenn nicht ganz verhindern. Die ganzjährige Befahrbarkeit einer Wasserstraße ist in der einschlägigen Literatur und unter den Fachleuten ein viel diskutiertes Thema. Keating //1// sagte 1970: "An ice-breaker is an ice-maker." Auch einige Fachleute in der deutschen Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sind dieser Meinung. Es gibt aber in der Literatur //2//, //3// auch einige Hinweise, daß der Anstieg der Eisbildung infolge des mechanischen Eisbrechens nicht so drastisch ist, wie allgemein angenommen wird. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wird in den nächsten Wintern den Wärmehaushalt einer Bundeswasserstraße hinsichtlich dieser Problematik wissenschaftlich untersuchen.

Vor der Erörterung der einzelnen Fragestellungen sollten einige physikalische Grundsätze erläutert werden:

Eine wesentliche Voraussetzung für das biologische Leben der Tiere und Pflanzen in Gewässern, vor allem in den gemäßigten und kälteren Zonen, ist die "Dichte-Anomalie" des Wassers (siehe Bild 1). Während alle anderen chemischen Stoffe bei abnehmender Temperatur eine zunehmende Dichte aufweisen, gibt es bei der Phasenumwandlung des Wassers zum Eis eine damit einherge-

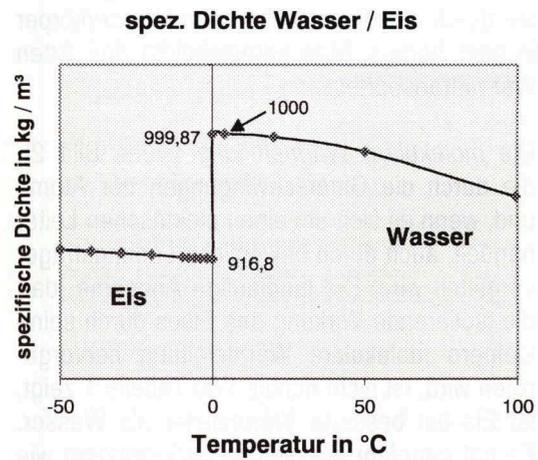


Bild 1: Dichte-Anomalie des Wassers

hende Abnahme der Dichte, die durch die Anordnung der Wassermoleküle bei der Kristallisation gegeben ist (siehe Tabelle 1). Diese Dichte-Anomalie bedingt im Gegensatz zu allen anderen Stoffen, daß Eis auf seiner Schmelze schwimmt. Dies sollte aber nicht zu dem Trugschluß führen, daß Eis bei weiter abnehmender Temperatur auch eine abnehmende Dichte aufweist. Wie Bild 1 zeigt, hat auch Eis bei sinkender Temperatur eine zunehmende Dichte. Dieses Verhalten hat weitreichende Konsequenzen, denn bei sinkender Temperatur bilden sich im Eis durch die zunehmende Dichte Risse, die sich mit Wasser füllen können, das dann wiederum gefriert. Bei steigenden Temperaturen dehnt sich das Eis aus und kann somit einen erheblichen Druck auf bestehende Bauwerke ausüben.

Bezeichnung	Einheit	Wasser	Eis
Dichte (0° C)	ρ	999,87	916,2
Wärmeleitfähigkeit	λ	0,562	2,2
z. Vergleich: Beton	λ	2,1	
Luft	λ	0,026	
spez. Wärmekapazität	c_p	4182	1930
Emissionsgrad	ε	0,97	0,97
Latente Wärme	Δh_s	335	

Tabelle 1 Physikalische Konstanten

Die eingangs beschriebene Problematik des Wärmehaushaltes eines Kanals im Zusammenhang mit der Eisbrechung ist stark abhängig von den physikalischen Gegebenheiten bei dem Transport von Wärme durch die Eisschicht in den Wasserkörper hinein oder heraus. Man unterscheidet drei Arten des Wärmetransportes:

- 1.) Die *molekulare Wärmeleitung* (siehe Bild 2), die durch die Gitterschwingungen der Atome und, wenn es sich um einen elektrischen Leiter handelt, auch durch bewegliche Ladungsträger vermittelt wird. Die landläufige Annahme, daß die isolierende Wirkung des Eises durch seine kleinere molekulare Wärmeleitung hervorgerufen wird, ist nicht richtig. Wie Tabelle 1 zeigt, ist Eis ein besserer Wärmeleiter als Wasser. Es hat ungefähr die gleiche Isolierwirkung wie Beton.

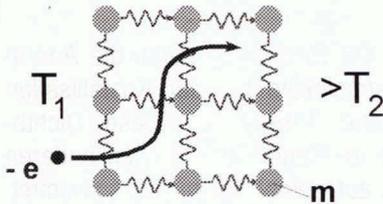


Bild 2: Molekulare Wärmeleitung

- 2.) *Wärmeleitung durch Konvektion*: Mit dem Wärmetransport geht ein Massetransport einher (siehe Bild 3). Es wird zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden. Bei der freien Konvektion ist die treibende Kraft für den Masse- und Wärmetransport ein temperaturabhängiger Dichtegradient. Beispielsweise wird im Herbst in einem See Wasser, das sich an der Wasseroberfläche auf 4 °C abgekühlt hat, aufgrund der größeren Dichte auf den Seegrund transportiert und dafür wärmeres Wasser nach oben.

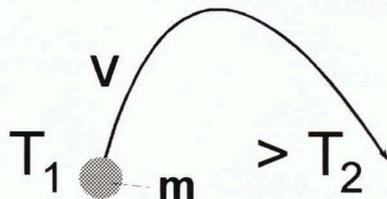


Bild 3: Wärmeleitung durch Konvektion

- 3.) *Wärmetransport durch Strahlung*: Jeder Körper sendet elektromagnetische Strahlung entsprechend seiner Temperatur aus. Je höher seine Temperatur ist, desto energiereicher ist die abgegebene Strahlung (Bild 4). Da aber auch

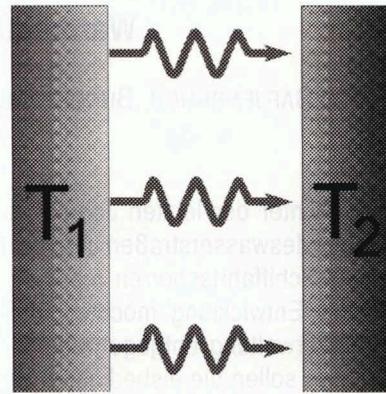


Bild 4: Wärmeleitung durch Strahlung

jeder Körper elektromagnetische Strahlung absorbiert und in Wärme umwandelt, kann ein Wärmetransport zwischen zwei Körpern nur stattfinden, wenn sie sich in ihrer Temperatur unterscheiden. In dem hier interessanten Temperaturbereich wird der Wärmetransport durch Infrarotstrahlung vermittelt, deren Intensität durch das *Stefan-Boltzmannsche Gesetz* gegeben ist: $M = \epsilon \times \sigma \times T^4$, $M =$ spez. Ausstrahlung, $\epsilon =$ Emissionsgrad, $\sigma =$ *Stefan-Boltzmann-Konstante*, $T =$ Temperatur (siehe Bild 5). Die Strahlung der Sonne liegt im kurzwelligeren Bereich (siehe Bild 6), da ihre Oberflächentemperatur sehr hoch ist. Kurzwellige Strahlung hat gegenüber der langwelligeren (Infrarot-) Strahlung eine größere Eindringtiefe in einen Körper. So kann z.B. die kurzwellige Strahlung der Sonne eine dickere Eisschicht durchdringen und diese von unten her an der Wasser-Eis-Grenzfläche auftauen.

In Bild 7 sind die verschiedenen Wärmeströme, die für eine Erwärmung des Kanals im Sommer verantwortlich sind, schematisch dargestellt. Die kurzwellige Sonnenstrahlung kann zum Teil die Erdatmosphäre durchdringen und gelangt aufgrund

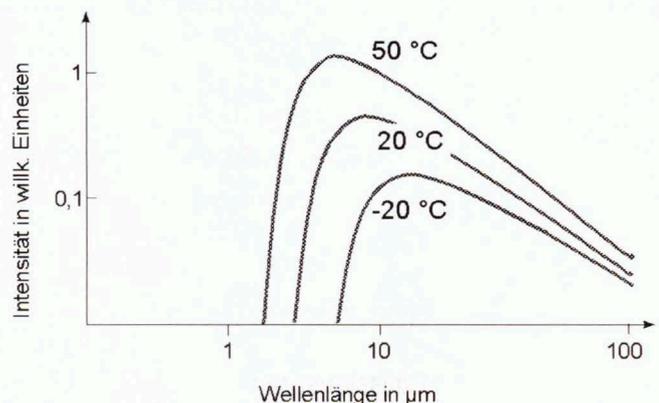


Bild 5: Schematisches Spektrum der langwelligeren Strahlung

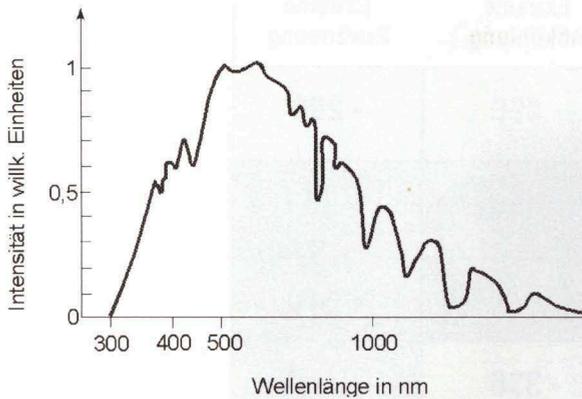


Bild 6: Schematisches Spektrum der kurzwelliger Strahlung

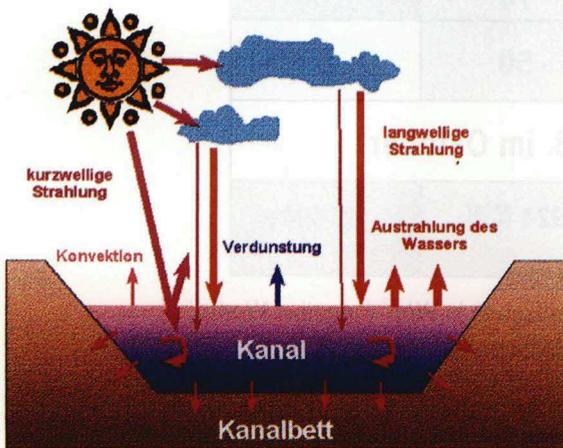


Bild 7: Schematische Darstellung der Wärmeströme in einem Kanal im Sommer (Erwärmung)

der größeren Eindringtiefe, je nach Trübung, tief in das Gewässer hinein und kann somit tiefere Wasserschichten erwärmen. Ein anderer Teil der kurzwelliger Sonnenstrahlung wird in der Erdatmosphäre und in den Wolken thermalisiert, d.h. absorbiert und als Wärmestrahlung emittiert. Die Strahlung erreicht so als langwellige (Infrarot-) Strahlung das Gewässer und erwärmt hier die oberen Schichten. Ein Teil der Wärme an der Oberfläche des Gewässers gelangt durch molekulare Wärmeleitung (siehe Tabelle 1, Wasser ist ein schlechter Wärmeleiter) oder bei einem Fließgewässer noch stärker durch Konvektion in tiefere Schichten und kann auch den Gewässerboden erwärmen. Den größeren Teil der aufgenommenen Wärme gibt der Kanal durch die Infrarot-Abstrahlung an der Wasseroberfläche wieder ab. Einen weiteren Teil verliert er durch die Verdunstung des Wassers an seiner Oberfläche und durch die Erwärmung kälterer Luft, die durch den Wind

(Konvektion) an die Wasseroberfläche herangetragen wird.

Tabelle 2 zeigt die oben besprochenen Wärmeströme mit ihren Jahresmittelwerten und ihren Extrema in einer Übersicht, damit der Leser einen Eindruck von den Größenordnungen der unterschiedlichen Wärmeströme bekommt. In der unteren Spalte ist die Leistung angegeben, die ein Kanal von 50 km Länge und 55 m Breite bei Erwärmung aufnimmt bzw. bei Abkühlung abgibt. Hier wird sehr klar deutlich, daß eine extreme Abkühlung nur schwerlich oder mit erheblichem finanziellem Aufwand durch anthropogene Maßnahmen (z.B. Kühlwassereinleitung eines Kraftwerkes) kompensiert werden kann //4//. Die Wärme vom Gewässerbett ist meßtechnisch schwer zu bestimmen und auch weitestgehend vernachlässigbar, nur im Winter bei einer Eisbedeckung liegt sie in einer Größenordnung, die in die Betrachtung der Wärmeströme mit einbezogen werden muß.

In Bild 8 sind die Wärmeströme eines Kanals im Herbst (Abkühlung) schematisch dargestellt. Die kurzwellige Strahlung der Sonne und damit auch die langwellige Strahlung aus der Atmosphäre und aus den Wolken ist wesentlich kleiner als im Sommer. Das Gewässer hat seine jahreszeitlich höchste Temperatur. Aufgrund der starken Ausstrahlung des Kanals im infraroten Bereich kommt es besonders in wolkenlosen Nächten zur Abkühlung des Gewässers. Auch Konvektion und Verdunstung und der damit einhergehende Wärmeverlust steigen an. Aufgrund des positiven Dichtegradienten des Wassers zwischen 0° und 4 °C (siehe Bild 1) kommt es auch im Wasser zu einem größeren Wärmetransport durch die freie Konvektion, wobei

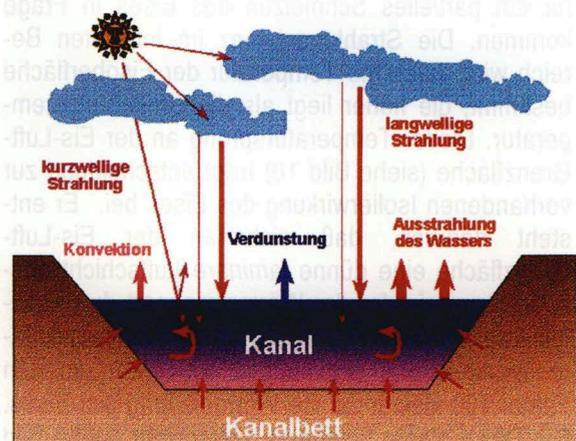


Bild 8: Schematische Darstellung der Wärmeströme in einem Kanal im Herbst (Abkühlung)

Bezeichnung	Jahresmittel	Extreme Abkühlung	Extreme Erwärmung
Ausstrahlung des Wassers des (6 - 60µm)	- 350	- 490	- 290
Langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre (6 - 60 µm)	+270	+ 150	+ 390
Kurzwellige Strahlung v. der Sonne (0,3-6 µm)	+ 140	+ 4	+ 340
Σ Strahlung	+ 60	- 336	+ 440
Verdunstung (-) bzw. Kondensation (+)	- 40	- 200	+ 25
Konvektion	- 4	- 70	+ 50
Niederschlag	- 1	- 50	0
Wärme vom Gewässerbett	~ 40 z.B. im Oktober		
Strahlung für den Referenzkanal (eisfrei)	+ 165 MW	- 924 MW	+ 1210 MW

Tabelle 2: Tagessummen der Wärmebilanz von Wasseroberflächen in W/m² (negative Werte bedeuten einen Wärmeverlust bzw. positive Werte einen Wärmegewinn für das Gewässer)

in einem Kanal mit Schiffsbewegungen die erzwungene Konvektion durch den Schiffspropeller stark überwiegen kann.

Bei weiterer Abkühlung des Kanals kommt es dann im Winter zur Eisbildung. In Bild 9 sind die Wärmeströme eines Kanals bei geschlossener Eisdecke dargestellt. Nur die kurzwellige Strahlung kann eine klare Eisdecke zum Teil durchdringen und für eine Erwärmung der Wasser-Eis-Grenzfläche bzw. für ein partielles Schmelzen des Eises in Frage kommen. Die Strahlungsbilanz im infraroten Bereich wird durch die Temperatur der Eisoberfläche bestimmt, die höher liegt als die Umgebungstemperatur. Dieser Temperatursprung an der Eis-Luft-Grenzfläche (siehe Bild 10) trägt entscheidend zur vorhandenen Isolierwirkung des Eises bei. Er entsteht dadurch, daß sich an der Eis-Luft-Grenzfläche eine dünne *laminare* Luftschicht ausbilden kann, in der der Wärmetransport durch molekulare Wärmeleitung erfolgen muß. Die molekulare Wärmeleitung der Luft ist wiederum um den Faktor 100 kleiner als die Wärmeleitung des Eises. Die Dicke dieser laminaren Luftschicht (siehe Bild 11) und damit auch die Isolierwirkung des Eises hängt von der Windgeschwindigkeit ab. Dieses Verhalten ist vereinfacht in Bild 12 dargestellt. Aufgetragen ist der relative Wärmestrom, d.h. der

Quotient aus dem Wärmestrom einer eisbedeckten und einer eisfreien Wasseroberfläche, in Abhängigkeit von der Eisdicke für verschiedene Windgeschwindigkeiten. Es ist deutlich zu erkennen, daß der relative Wärmestrom sich schon bei dünnen Eisdecken (ca. 25 cm) gegenüber offenen Wasseroberflächen halbiert. Noch größer wird die Isolierwirkung im Falle einer mit Neuschnee bedeckten Eisdecke. Jeder Zentimeter Neuschnee hat eine Isolierwirkung von ungefähr 75 cm Eis //5//.

Eine zweite Komponente zur Isolierwirkung des Eises liegt in der Tatsache, daß bei einer Neueisbildung die *latente Wärme* frei wird (siehe Tabelle 1, 335 kJ pro kg). Diese Wärme muß durch das Eis abgeführt werden (siehe Bild 11) und ist somit ein weiterer zeitlich begrenzender Faktor in der Abkühlung des Kanals. Beispielsweise muß bei einer Neueisbildung von 5 cm innerhalb von 12 Stunden eine Leistung von 355 W/m² durch die Eisdecke abgeführt werden (siehe Tabelle 2, Vergleich mit den anderen Wärmeströmen). Weiterhin reduziert die Eisbildung den Wärmeverlust durch Verdunstung, da der Wärmeverlust durch Sublimation des Eises wesentlich geringer ist (siehe Bild 9).

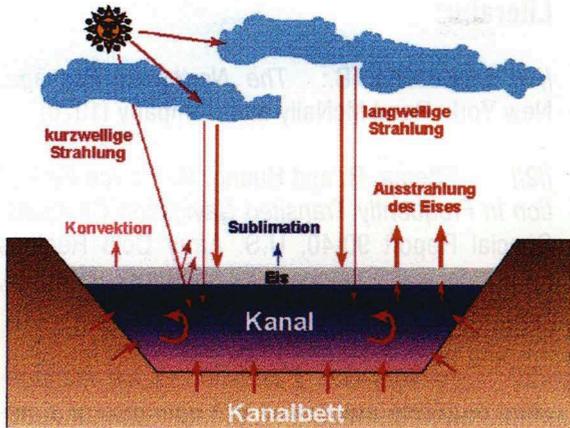


Bild 9: Schematische Darstellung der Wärmeströme in einem Kanal im Winter (Eisbildung)

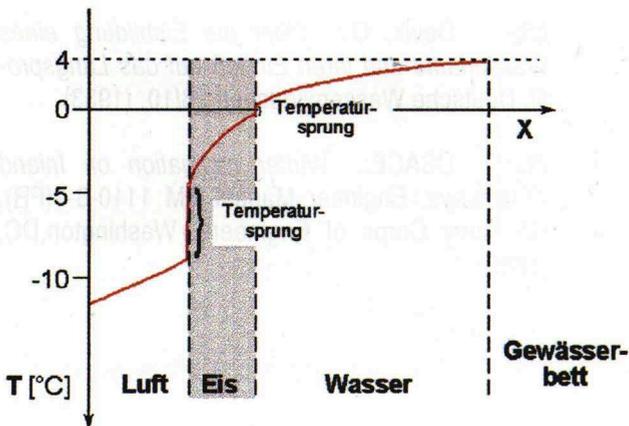


Bild 10: Temperaturverlauf in der Eis-Luft- und in der Eis-Wasser-Grenzschicht

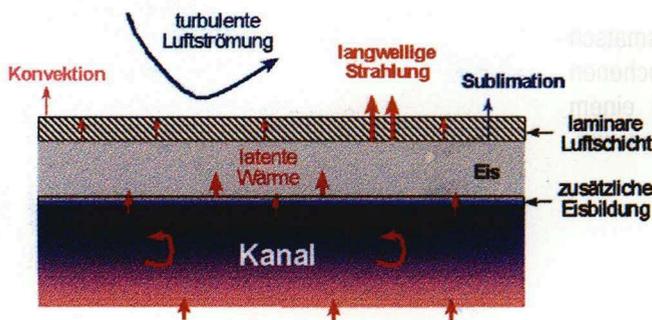


Bild 11: Eisschicht mit laminarer Luftschicht (nicht maßstabsgerecht)

Ein mechanisches Eisbrechen wird sich sicherlich negativ durch erhöhten Wärmeverlust auf den Wärmehaushalt des Kanals bei Eisbedeckung auswirken. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde wird versuchen, die Größe dieser Auswirkungen im nächsten Eiswinter mit meßtechnischen Mitteln zu quantifizieren. In der Literatur gibt es mehrere Hinweise //2//, //3//, daß die negativen Auswirkungen des mechanischen Eisbrechens nicht so dramatisch sind, wie vielleicht allgemein angenommen wird. Aber durch das massive Eisbrechen können noch einige ungelöste Probleme //6// in Schleusen und auf der Strecke auftreten (siehe Bild 13).

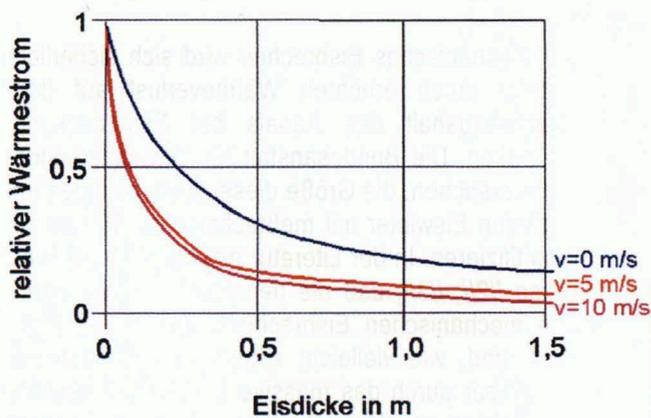


Bild 12: Abhängigkeit des relativen Wärmestroms von der Eisdicke für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten

Literatur:

//1// Keating, B.: *The Northwest Passage*, New York: Rand McNally and Company (1970)

//2// Ettema, R. and Huang, H.-P.: *Ice Formation In Frequently Transited Navigation Channels*, Special Report 90-40, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, (1990)

//3// Ashton, G.: *Evaluation of ice management problems associated with operation of a mechanical ice cutter*, Special Report 214, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, (1974)

//4// Deyhle, C.: *Interne Studie*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, (1998)

//5// Devik, O.: *Über die Eisbildung eines Wasserlaufs und ihren Einfluß auf das Längsprofil*, Deutsche Wasserwirtschaft 28/10, (1933)

//6// USACE: *Winter navigation on Inland Waterways*, Engineer Manual EM 1110-8-1(FR), US Army Corps of Engineers, Washington,DC, (1990)

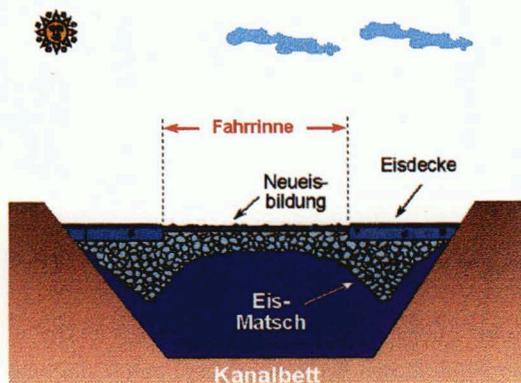


Bild 13: neue Probleme: Anhäufung von Eismatsch bzw. Eis an den Rändern der gebrochenen Fahrinne in Kurvenbereichen, die bei einem neuen Eisaufbruch nicht mehr gebrochen werden kann