

UTILISATION THERMIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES

APERÇU DES ÉVENTUELS IMPACTS PHYSIQUES ET ÉCOLOGIQUES

Les eaux superficielles suisses renferment d'immenses réserves d'énergie thermique renouvelable, dont une fraction pourrait servir à chauffer et refroidir les infrastructures proches. Une telle utilisation pourrait avoir des impacts, notamment via les rejets d'eau réchauffée ou refroidie. En se basant sur de nombreuses études, cet article détaille ces impacts et propose des recommandations concrètes visant à les minimiser et à garantir une exploitation durable.

Adrien Gaudard, Eawag*

Martin Schmid, Eawag

Alfred Wüest, Eawag

ZUSAMMENFASSUNG

THERMISCHE NUTZUNG VON OBERFLÄCHENGEWÄSSERN – ÜBERBLICK ÜBER DIE MÖGLICHEN AUSWIRKUNGEN

Die Schweizer Oberflächengewässer enthalten immense Reserven an erneuerbarer Wärmeenergie, von der ein Teil zum Heizen und Kühlen nahe gelegener Infrastrukturen dienen und somit fossile Brennstoffe und Elektrizität ersetzen könnte. Eine derartige Nutzung beruht auf bewährten Techniken: Sowohl in der Schweiz wie auch weltweit sind bereits zahlreiche Systeme in Betrieb oder in Planung. Dabei wird dem See-, Fluss- oder Grundwasser, je nach Bedarf Wärme entzogen oder hinzugefügt. Besonders tiefe Seen und grosse Flüsse sind für diesen Zweck geeignet. Nach dem Wärmeaustausch wird das verwendete Wasser meist mit einer veränderten Temperatur wieder in das Gewässer zurückgeführt: Im Allgemeinen erfolgt im Winter eine Abkühlung und im Sommer eine Erwärmung.

Die dadurch verursachten Temperaturänderungen können für die Organismen und die Ökosysteme in den betroffenen Gewässern Konsequenzen haben. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass das Hauptrisiko die Empfindlichkeit mehrerer wichtiger Arten (z. B. Forellen) gegenüber zu hohen Temperaturen – typischerweise Temperaturen über 25 °C – darstellt. Diese Arten leiden heute bereits mancherorts unter den Folgen des Klimawandels. Eine zusätzliche Erwärmung könnte die Konkurrenzfähigkeit

INTRODUCTION

L'eau, du fait de sa forte capacité thermique, peut stocker la chaleur très efficacement. Les eaux superficielles absorbent naturellement la chaleur du soleil et de l'air pendant le printemps et l'été, puis la restituent en hiver. Cet échange se produit lentement, si bien que la température de l'eau est plus stable que celle de l'air, en particulier dans les lacs profonds et les grandes rivières. Ceux-ci se prêtent donc bien à une utilisation pour le chauffage et le refroidissement (ci-après utilisation thermique).

Cette idée n'est pas nouvelle: déjà dans l'Empire romain, de l'eau froide circulait dans des bâtiments pour les refroidir. Les lacs, les rivières et les eaux souterraines sont autant de sources thermiques renouvelables, propres et fiables. En Suisse, l'utilisation de ce potentiel immense est à portée de main, étant donné que les grandes agglomérations se situent justement à côté des grands lacs et rivières (par exemple Zurich, Genève, Bâle, Berne, Lausanne, Zoug, Lucerne, Bienne, Neuchâtel ou Thoune). Cependant, la grande majorité de l'énergie pour le chauffage provient aujourd'hui encore de combustibles fossiles brûlés en chaudière, et de climatiseurs électriques pour le refroidissement [1]. L'utilisation thermique des eaux superficielles permettrait donc

* Contact: adrien.gaudard@eawag.ch

d'importantes économies de combustibles fossiles et d'électricité et irait dans le sens de la stratégie énergétique suisse. Elle favoriserait également un approvisionnement local avec des retombées positives pour l'économie.

TECHNIQUE

En hiver, la température des eaux superficielles est basse et relativement homogène (généralement entre 4 et 10 °C). Des pompes à chaleur traditionnelles peuvent néanmoins en extraire encore de l'énergie pour chauffer un autre fluide à plus de 60 °C via des cycles de compression et décompression [2]. Ce dernier peut ensuite être employé pour chauffer des bâtiments et des infrastructures.

En été, les eaux superficielles servent de moyen de refroidissement. Tant que l'eau extraite est suffisamment froide, elle peut être utilisée directement pour la climatisation et le refroidissement industriel. Les couches profondes des lacs et certains grands cours d'eau ont une température basse et relativement stable et se prêtent donc particulièrement bien à cet objectif.

Le savoir technique existe depuis l'invention des pompes à chaleur et des machines frigorifiques. En 1938 déjà, la chaleur de la Limmat à Zurich était extraite par une pompe à chaleur pour chauffer la mairie. Depuis cependant, peu de projets furent concrétisés, en grande partie à cause des prix très bas du pétrole et du charbon. Les quantités de chaleur utilisées sont faibles et se limitent à quelques installations de petite et moyenne taille, par exemple le campus universitaire à Lausanne, le quartier des Nations à Genève, certains quartiers de Zurich ou le nouveau réseau de chaleur à distance de La Tour-de-Peilz VD. Toutefois, de nouveaux systèmes de plus grande ampleur sont actuellement à l'étude dans diverses villes comme Genève, Lucerne, Zoug et Zurich. Les systèmes modernes opèrent généralement en circuit fermé, si bien que l'eau pompée n'entre pas en contact direct avec le système d'extraction de chaleur et n'est donc pas affectée chimiquement.

IMPACTS DANS LES EAUX SUPERFICIELLES

L'utilisation thermique modifie la température de l'eau utilisée. Cette dernière est refroidie si elle est utilisée pour le chauffage

(typiquement en hiver), et réchauffée si elle est utilisée pour le refroidissement (typiquement en été). S'il ne peut être recyclé, c'est-à-dire réutilisé pour une autre fin, cet effluent altéré thermiquement doit être restitué à l'environnement, souvent dans un lac ou un cours d'eau: c'est alors un rejet thermique (fig. 1 et fig. 2). Ceci peut avoir des conséquences pour l'écosystème concerné [3]. Premièrement,

l'effluent modifie la température de l'eau réceptrice (pollution thermique; encadré 1); en deuxième lieu, si l'eau n'est pas rejetée près du point d'extraction, il y a un risque de déplacement de nutriments et de polluants. Les effets sont surtout marqués localement mais, selon la température et le débit du rejet thermique, ils peuvent également se faire sentir à grande distance de ce dernier.

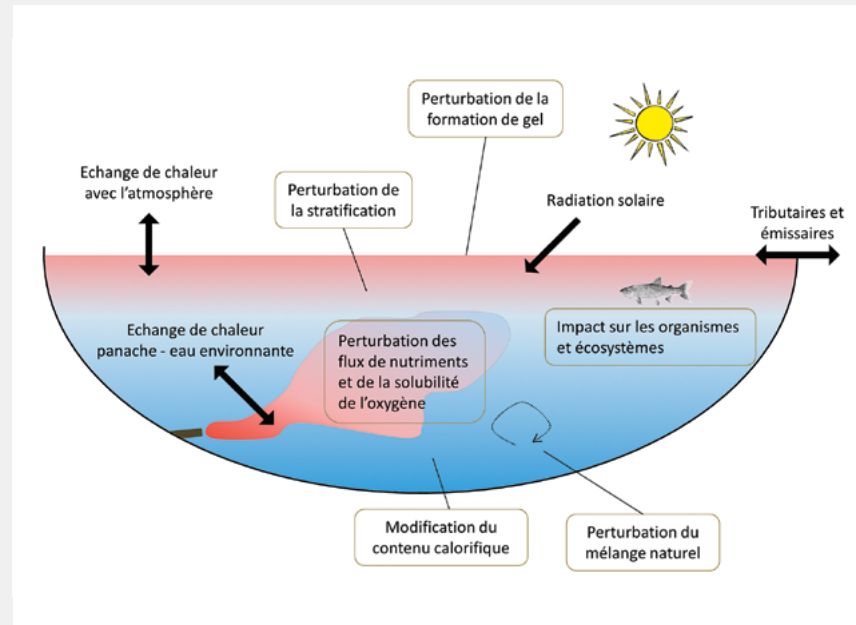


Fig. 1 Rejet thermique dans un lac: aperçu des processus touchés et conséquences possibles (encadrés)

Wärmeeintrag in einen See: Übersicht über die betroffenen Prozesse und möglichen Konsequenzen (umrahmt)

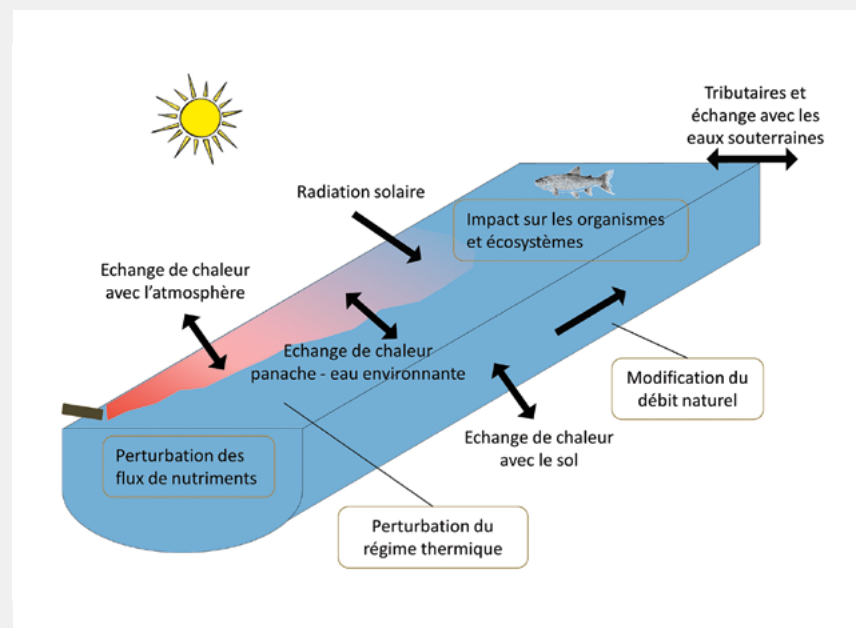


Fig. 2 Rejet thermique dans une rivière: aperçu des processus touchés et conséquences possibles (encadrés)

Wärmeeintrag in einen Fluss: Übersicht über die betroffenen Prozesse und möglichen Konsequenzen (umrahmt)

BASES LÉGALES SUISSES

La modification thermique de l'eau représente une pollution selon la loi sur la protection des eaux de 1991. L'ordonnance sur la protection des eaux de 1998 interdit donc de modifier la température des cours d'eau de plus de 1,5 °C dans les zones à truites (3 °C ailleurs). De plus, le déversement ne peut faire monter la température du cours d'eau au-dessus de 25 °C. Dans les eaux souterraines, la limite d'altération de température est fixée à 3 °C, excepté très localement. En revanche, aucune valeur n'est spécifiée concernant les lacs. L'ordonnance exige uniquement que le régime thermique naturel, la répartition des nutriments et les conditions de vie et de reproduction des organismes ne soient altérés.

Encadré 1

IMPACTS PHYSICO-CHIMIQUES

Un réchauffement ou refroidissement des eaux superficielles impacte les propriétés de l'eau et ainsi différents processus naturels. L'eau plus chaude est plus légère (le maximum de densité se trouvant à 4 °C), peut contenir moins d'oxygène dissous et permet des réactions chimiques plus rapides (leur vitesse double pour une hausse de 10 °C).

Impact d'un rejet thermique dans un lac

Dans les lacs, un rejet thermique forme un panache qui se disperse selon sa densité, celle de la colonne d'eau et les courants. Si le rejet ne se répartit pas dans les couches de surface, on peut définir un volume receveur dont la température moyenne va être progressivement affectée, tant qu'un mélange avec les autres couches ne se produit pas [4]. Un rejet en surface sera quant à lui plus vite dissipé dans l'atmosphère.

Ces effets interagissent notamment avec les mécanismes naturels de stratification [5]. L'impact final dépend de la quantité de chaleur injectée ou extraite, ainsi que de la saisonnalité et de la profondeur des rejets [6]. Ainsi, une injection d'eau chaude dans les couches de surface risque de prolonger la période de stratification (surtout en été, au printemps et en automne). En revanche, un apport froid en hiver peut stimuler le brassage des eaux, ce qui est souvent bénéfique pour l'oxygénation des couches profondes.

Le simple déplacement d'un certain volume d'eau peut également avoir des

conséquences. Par exemple, en cas de prise d'eau au-dessous de la thermocline et rejet au-dessus, cette dernière peut descendre de plusieurs mètres (selon le volume d'eau déplacé durant la saison), agrandissant la zone de croissance biologique. Dans un lac eutrophe (c'est-à-dire très productif), de l'eau extraite propre en surface et rejetée dans les couches profondes, souvent mal aérées et riches en composés réduits, pourrait amener de l'oxygène et, à terme, améliorer la qualité de l'eau.

Impact d'un rejet thermique dans une rivière

Dans les rivières, un rejet thermique est emporté par le courant et, à moins que le système de rejet ne promeuve un mélange rapide ou que le cours d'eau ne soit très turbulent, peut s'écouler sur plusieurs kilomètres avant d'être complètement incorporé à la rivière. En aval du point de rejet, la température de la rivière peut donc être hétérogène latéralement [7]. Au fil de son cours, la rivière revient progressivement à son état naturel en échangeant de la chaleur avec l'atmosphère [8]. Une certaine fraction de la pollution thermique peut cependant atteindre le plan d'eau receveur (lac ou océan). La manière dont la rivière plonge dans ce dernier peut également être affectée par un changement de température important: par exemple, une rivière plus chaude pénètre moins profondément. Ceci peut avoir des conséquences sur l'apport de nutriments, d'oxygène et de particules [9].

IMPACTS BIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES

Les rejets thermiques peuvent localement induire de fortes variations de température par rapport à l'état naturel, auxquelles les organismes et les écosystèmes ne sont pas préparés [3]. De plus, des effets moins intenses mais globaux peuvent se faire sentir: dans un lac, tout ou partie du volume d'eau peut être progressivement réchauffé ou refroidi, tandis que dans les rivières, la température est altérée sur tout le cours en aval du rejet.

Les relations entre température et vie aquatique sont multiples et complexes. Pratiquement tous les organismes poïkilothermes réagissent à un changement de température, étant donné que celle-ci régit leur capacité à se nourrir, se développer et se reproduire [10]. Une hausse de température accélère le métabolisme et augmente l'activité biologique. À l'opposé, un refroidissement rend les organismes plus lents et moins réactifs [11].

Chaque organisme aquatique a une plage de températures pour une activité optimale. Hors de celle-ci, l'organisme peut subir du stress ou être en danger de mort. Les limites thermales d'un individu donné sont cependant dépendantes de plusieurs facteurs [12-14]: stade de développement, acclimatation, saison, disponibilité de l'oxygène, présence de contaminants et de parasites, interactions avec d'autres organismes, etc. Les communautés sont ainsi localement adaptées et on ne peut définir de préférences thermales universelles.

MODÉLISATION: LAC DE CONSTANCE

Un récent travail de modélisation a simulé les impacts physiques d'une utilisation thermique réaliste du lac de Constance (surface: 472 km², profondeur maximale: 254 m, volume: 48 km³) [6]. En appliquant différents scénarios d'extraction de chaud et/ou de froid (jusqu'à 1 GW), les résultats suivants ont été relevés:

- possible allongement de la période estivale de stratification (au maximum de quelques jours), notamment en cas de rejet d'eau chaude dans la partie supérieure du lac;
- possible renforcement du brassage hivernal en cas d'utilisation pour le réchauffement, c'est-à-dire de rejet d'eau froide;
- altération de la température de la surface toujours en deçà de 0,2 °C;
- effets moindres si la stratification naturelle est utilisée pour minimiser la différence de température entre le rejet et l'eau ambiante (de l'eau réchauffée est rejetée plus en surface, de l'eau refroidie plus en profondeur);
- effets moindres en cas d'utilisation double de chaud et de froid, même si l'intensité d'utilisation diffère avec la saison.

On peut présumer que ces impacts n'auraient pas de conséquence écologique majeure.

Encadré 2

Généralement, les organismes complexes sont plus sensibles que les organismes simples [15]. Ainsi, les microorganismes sont souvent très résistants, tandis que les poissons peuvent rapidement souffrir de conditions de température inadaptées. Aujourd'hui, les réchauffements sont particulièrement critiques (et ce spécialement en été), car beaucoup d'espèces vivent déjà proches de leurs limites thermiques supérieures du fait du changement climatique.

Les organismes mobiles (par exemple les poissons) cherchent constamment à se trouver dans une eau à une température favorable [13]. Ainsi, il a été souvent observé que des espèces sont attirées ou fuient les environs d'un rejet thermique, selon leurs préférences [16]. Si l'intégralité des habitats d'un lac ou d'une rivière sont trop chauds ou froids pour une certaine espèce, cela peut être problématique car les individus ne disposent plus des refuges thermiques parfois essentiels à leur survie [8]. Dans cette éventualité, certaines espèces pourraient perdre leur habitat, être rendues incapables de migrer dans une rivière ou disparaître de certaines régions. La variabilité thermique naturelle de nombreux cours d'eau a déjà fortement reculé du fait de leur canalisation et de la construction de barrages.

Le timing de la plupart des cycles biologiques (p. ex. l'éclosion, la reproduction ou encore la migration) est régi par la température [10, 17]. Une altération de cette dernière peut ainsi avancer ou retarder ces processus, provoquant potentiellement une désynchronisation avec des cycles saisonniers tels que la disponibilité de la nourriture ou d'un partenaire [18].

Les études de terrain portant sur des réchauffements de faible à moyenne ampleur, c'est-à-dire au maximum deux à trois degrés, ont discerné les impacts écologiques suivants:

- augmentation de la richesse en espèces et de la productivité;
- avancement et amplification des efflorescences algales, et en parallèle augmentation du broutage par les herbivores [19-21];
- accélération du développement des organismes (p. ex. les œufs éclosent plus tôt, les juvéniles atteignent plus rapidement la maturité, etc.) [22, 23];
- allongement des périodes de croissance et de reproduction [22];
- plus faible mortalité en hiver [22];
- transition vers un régime alimentaire plus large [24];
- réduction de la biomasse totale, de la densité en espèces et de la taille corporelle moyenne, en particulier chez les ectothermes [21, 25, 26];
- déclin des espèces adaptées aux eaux froides [21, 27-30];
- plus forte domination des espèces eurythermes, qui tolèrent typiquement aussi des niveaux d'oxygène plus faibles [30, 31].

Certains effets d'un réchauffement sont similaires à ceux d'une eutrophication des eaux [24, 32]. Une hausse de température favorise également l'occurrence et la propagation de maladies et augmente la toxicité de la plupart des polluants [3, 33].

Généralement, un refroidissement modéré des eaux superficielles naturelles peut être vu positivement, et ce surtout durant la saison chaude [6]. En effet, un tel impact peut en partie compenser les effets du changement climatique et soulager les espèces adaptées aux eaux froides. Une compensation pourrait également être observée dans les rivières affectées par des réservoirs pour la production hydroélectrique, dont l'effet sur le

ÉTUDE DE CAS: LAC STECHLIN

Le lac Stechlin en Allemagne (surface: 4,25 km², profondeur maximale: 68 m, volume: 0,1 km³) est un lac qui fut fortement utilisé pour le refroidissement d'une centrale nucléaire de 1966 à 1989. Avec des débits de l'ordre de 300 000 m³/jour, de l'eau était pompée dans le lac Nehmitz adjacent, réchauffée d'environ 10 °C et rejetée dans le lac Stechlin [34]. Les nombreuses études des impacts font du lac Stechlin le cas de pollution thermique d'un lac le mieux analysé.

En moyenne, le lac fut réchauffé de 1 °C [34]. Le vent et donc les courants déterminaient largement la distribution du panache d'eau chaude. Les couches de surface furent spécialement affectées en été, alors qu'elles sont naturellement isolées des couches plus profondes. Ces dernières recevaient la chaleur lors des périodes de brassage. La stratification estivale fut renforcée, celle hivernale fut affaiblie ou disparut, et le gel de la surface fut réduit [4].

L'eau déplacée étant plus riche en nutriments que celle du lac Stechlin, une augmentation de la croissance planctonique fut observée, ainsi qu'une détérioration des conditions d'oxygène [35]. La structure de la communauté de phytoplancton, initialement dérangée, retourna proche de son état initial alors que le rejet thermique était toujours présent [34]. Les cycles saisonniers furent avancés, parfois de plusieurs mois pour le périphyton [36]. La vitalité et la productivité des organismes benthiques augmentèrent pendant la saison froide [34].

Les principaux effets négatifs furent observés en été, alors que la température du rejet dépassait 25 °C [34]: la diminution de la production, la mort d'organismes et la libération de matière organique (notamment des phosphates). Le lac préserva cependant son caractère oligotrophe [35]. Aucun dommage ou changement dans la communauté ne peut être attribué sans équivoque au réchauffement.

Actuellement, le lac Stechlin s'est entièrement remis de cette pollution thermique et la qualité de son eau est excellente.



Lac Stechlin

Encadré 3

régime thermique est souvent un refroidissement en été et un réchauffement en hiver (soit l'opposé de l'effet de l'utilisation thermique).

CONSIDÉRATIONS PRATIQUES ET RECOMMANDATIONS

Il est important que les altérations de température anthropogéniques restent mesurées par rapport à la variabilité naturelle. Ainsi, pour une rivière à fort dynamisme, des altérations plus importantes seront tolérables par rapport à un lac, dont le régime thermique est naturellement plus stable [12]. Certains types d'impact doivent toujours être considérés avec prudence: l'augmentation des températures maximales, la diminution des températures minimales ou encore les variations temporelles à fréquence rapide. En Suisse, l'aspect critique majeur consiste en des températures trop élevées en été, auxquelles plusieurs espèces ne sont pas adaptées et pourraient en souffrir directement. Typiquement, les salmonidés (truites, corégones, ombles, etc.) préfèrent les températures au-dessous de 20 °C, bien que la majorité puisse survivre jusqu'à plus de 25 °C [12]. D'autres espèces (p. ex. les carpes, les gobies invasives et le silure) tolèrent mieux ces températures et seraient avantagées. Ceci concerne la plupart des cours d'eau de basse altitude, ainsi que les lacs peu profonds.

Cet aspect rend l'extraction de froid en été (pour le refroidissement industriel ou la climatisation) délicate dans les eaux superficielles pouvant atteindre de hautes températures (typiquement 25 °C). Une utilisation modérée, c'est-à-dire n'augmentant pas la température de plus de quelques dixièmes de degrés au total, devrait rester possible. De plus gros systèmes devraient garantir un refroidissement du rejet (p. ex. retour en spray ou système évaporatif) ou préférer d'autres sources de froid telles que les lacs profonds.

Le problème de températures trop basses en hiver est très limité et concerne en particulier les petits cours d'eau et les couches supérieures des petits lacs, spécialement en altitude. Un refroidissement peut par exemple empêcher le développement des œufs de poisson et retarder la nouvelle génération.

L'extraction de chaleur en hiver est donc plutôt limitée par l'efficacité du cycle thermodynamique. Bien que cela reste possible avec une source plus froide, de tels systèmes nécessitent généralement une température de l'eau d'au moins 5 °C afin que les pompes à chaleur fonctionnent avec une efficacité satisfaisante et donc

une consommation d'électricité moindre [2]. Les grandes rivières et la plupart des lacs sont généralement appropriés à un tel usage.

CONCLUSIONS

En considérant les objectifs énergétiques – un approvisionnement durable en énergie, une réduction de la consommation ainsi que des émissions de CO₂ –, l'utilisation des eaux superficielles comme source de chaleur et de froid est extrêmement attractive. En Suisse, les réserves renouvelables disponibles permettent une exploitation conséquente avec des impacts négligeables sur la dynamique de ces écosystèmes naturels. Les quelques risques possibles peuvent être évités ou suffisamment minimisés grâce à une conception réfléchie des systèmes d'utilisation thermique et une coordination entre les différents acteurs. Une campagne de mesures, éventuellement complétée par un modèle simple, permettrait de définir plus précisément le potentiel thermique d'un lac ou d'une rivière donné en fonction de l'écosystème en place et des conditions d'exploitation (notamment, pour un lac, la profondeur des rejets et, pour une rivière, leur position le long de son cours). Le post-monitoring des nouveaux systèmes est également primordial, pouvant fournir une observation directe des effets possibles et donc un retour d'expérience précieux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Infras AG et al. (2015): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken. Bundesamt für Energie (BFE)*
- [2] *Zogg, M. (2009): Wärmepumpen*
- [3] *Langford, T. E. L. (1990): Ecological Effects of Thermal Discharges. London: Springer Netherlands*
- [4] *Kirillin, G. et al. (2013): Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime. Journal of Hydrology 496: 47–56*
- [5] *Eawag (1981): Wärmepumpen an Oberflächengewässern*
- [6] *Fink, G. et al. (2014): Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. Water Resources Research 50(9): 7285–7301*
- [7] *Lugg, A.; Copeland, C. (2014): Review of cold water pollution in the Murray-Darling Basin and the impacts on fish communities. Ecological Management & Restoration 15(1): 71–79*
- [8] *Caissie, D. (2006): The thermal regime of rivers: A review. Freshwater Biology 51(8): 1389–1406*
- [9] *Kennedy, R. H.; Walker, W. W. (1990): Reservoir nu-*

trient dynamics. Reservoir limnology: ecological perspectives. John Wiley and Sons, New York, p. 109–132

- [10] *Mulhollem, J. J. et al. (2016): Effects of heated effluent on Midwestern US lakes: implications for future climate change. Aquatic Sciences 78: 743–753*
- [11] *Astles, K. L. et al. (2003): Regulated Rivers and Fisheries Restoration Project: Experimental study of the effects of cold water pollution on native fish. NSW Fisheries Office of Conservation*
- [12] *Hunziker, S.; Wüest, A. (2011): Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen – eine Literaturanalyse. Eawag, Kastanienbaum*
- [13] *Coutant, C. C. (1999): Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters. Oak Ridge National Lab., TN (US)*
- [14] *Khalanski, M.; Gras, R. (1996): Rejets thermiques en rivières et hydrobiologie: Un aperçu sur l'expérience française. La Houille Blanche 5/1996: 13–18*
- [15] *Hester, E. T.; Doyle, M. W. (2011): Human Impacts to River Temperature and Their Effects on Biological Processes: A Quantitative Synthesis. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 47(3): 571–587*
- [16] *Coulter, D. P. et al. (2014): Thermal habitat quality of aquatic organisms near power plant discharges: potential exacerbating effects of climate warming. Fish Manag Ecol. 21(3): 196–210*
- [17] *Wedekind, C.; Küng, C. (2010): Shift of Spawning Season and Effects of Climate Warming on Developmental Stages of a Grayling (Salmonidae). Conservation Biology 24(5): 1418–1423*
- [18] *Olden, J. D.; Naiman, R. J. (2010): Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. Freshwater Biology 55(1): 86–107*
- [19] *Pyka, J. P. et al. (2013): Long-term trends in changes of the chemical composition of waters in lakes heated by electric power plants. Archives of Polish Fisheries 21(4): 343–355*
- [20] *Ingleton, T.; McMinn, A. (2012): Thermal plume effects: A multi-disciplinary approach for assessing effects of thermal pollution on estuaries using benthic diatoms and satellite imagery. Estuarine, Coastal and Shelf Science 99: 132–144*
- [21] *Moore, M. V. et al. (1996): Consequences of elevated temperatures for zooplankton assemblages in temperate lakes. Archiv für Hydrobiologie 135(3): 289–319*
- [22] *Jeppesen, E. et al. (2010): Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. Hydrobiologia 646(1): 73–90*
- [23] *Küttel, S. et al. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten schweizerischer Fließgewässer. EPFL-Report-187346*
- [24] *Jeppesen, E. et al. (2012): Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. Hydrobiologia 694(1): 1–39*

- [25] Winder, M. et al. (2009): Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 276(1656): 427–435
- [26] Emmrich, M. et al. (2014): Geographical patterns in the body-size structure of European lake fish assemblages along abiotic and biotic gradients. *Journal of Biogeography* 41(12): 2221–2233
- [27] Lessard, J. L.; Hayes, D. B. (2003): Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River research and applications* 19(7): 721–732
- [28] Isaak, D. J. et al. (2012): Climate change effects on stream and river temperatures across the north-west U.S. from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change* 113(2): 499–524
- [29] Haynes, J. M. et al. (1989): Response of Sport Fishes to Thermal Discharges into the Great Lakes: Is Somerset Station, Lake Ontario, Different? *Journal of Great Lakes Research* 15(4): 709–718
- [30] Khalanski, M. et al. (2008): Étude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécologie Appliquée* 16: 53–108
- [31] Poff, N. L. et al. (2002): Aquatic ecosystems and global climate change. *Pew Center on Global Climate Change*, Arlington, VA. 44
- [32] Feuchtmayr, H. et al. (2009): Global warming and eutrophication: Effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology* 46(3): 713–723
- [33] Heugens, E. H. W. et al. (2001): A Review of the Effects of Multiple Stressors on Aquatic Organisms and Analysis of Uncertainty Factors for Use in Risk Assessment. *Critical Reviews in Toxicology* 31(3): 247–284
- [34] Richter, D. et al. (1979): Temperatur und Wärmehaushalt des thermisch belasteten Stechlin- und Nehmitzsees. *Akad.-Verlag*
- [35] Koschel, R. H. et al. (2002): Primary production of phytoplankton and nutrient metabolism during and after thermal pollution in a deep, oligotrophic lowland lake (Lake Stechlin, Germany). *Proceedings-International Association of Theoretical and Applied Limnology* 28(2): 569–575
- [36] Casper, S. J. et al. (1985): The plant communities. in *Lake Stechlin*, Springer, p. 129–195

> FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

dieser Arten gegenüber weniger empfindlichen Arten (z. B. Weissfische) vermindern. Ausserdem kann eine Temperaturveränderung die Entwicklung, das Verhalten und die Fortpflanzung der Organismen stören, was sich schlussendlich auf die Artenzusammensetzung und das Funktionieren des Ökosystems auswirken kann. Die durch Heizbetrieb verursachten mässigen Abkühlungen von Gewässern sind hingegen oft unkritisch.

Durch eine reflektierte Planung der Wärme- und Kältenutzung können mögliche Auswirkungen verringert und eine nachhaltige thermische Nutzung erreicht werden.



www.aquaform.ch

RepaFlex® Reparaturkupplungen für Wasserleitungen – mit patentiertem Verschlussystem.

Erste Wahl für wertbeständige Reparaturen von Leitungsbrüchen oder Korrosionsschäden an Wasserleitungen.

Bruchstellen oder Korrosionsschäden werden durch die flexible Edelstahl-Reparaturkupplung mit dem patentierten Verschlussystem hermetisch abgedichtet. Reparaturen bis 200 mm Länge, Brüche mit Versatz bis zu 10 mm und Auswinkelungen bis 3° pro Seite sind realisierbar. Einsatz bis 16 bar möglich.



KRAUSZ

**SVGW
SSIGE**

EN14525

Produkteinformationen

- nicht längskraftschlüssig
- Werkstoff Edelstahl
- Dichtung EPDM für Trinkwasser (KTW / W270)
- Schlossschrauben und Sechskantmuttern aus rostfreiem Stahl (V2A), Gewinde gegen Festfressen mit Zink plattiert
- Betriebsdruck Wasser bis PN16
- Auswinkelungen bis max. 3° pro Seite
- zulässige Betriebstemperatur bis 25°C
- Verwendung als Kupplung möglich



Aquaform AG, Gewerbestrasse 16, 4105 Biel-Benken
Telefon 061 726 64 00, info@aquafarm.ch, www.aquafarm.ch

Aquaform
Rohre und Formstücke