

# Der Klimawandel hat einen zweifachen Anstieg der Temperaturen in der Reifephase zur Folge

## Einleitung

In der Zukunft ist ein weiterer Anstieg der Lufttemperatur in der Vegetationsperiode in den klassischen Weinbauregionen Mitteleuropas zu erwarten. Da die Rebe stark auf Änderungen der Temperaturbedingungen reagiert, sind deutliche Auswirkungen auf die Rebphänologie, die Traubenreife und die Weintypizität die Folge. Ziel der vorliegenden Studien war es daher, die phänologische Entwicklung, sowie die Temperaturbedingungen in den verschiedenen Phänophasen im luxemburgischen Weinbaugebiet unter sich verändernden klimatischen Bedingungen zu untersuchen.

## Methodik der Untersuchungen

Die Basis der vorliegenden Untersuchungen stellen eine Zeitserie der Tagesmitteltemperaturen im Zeitraum 1970 bis 2100 für das luxemburgische Weinbaugebiet dar, welche aus dem Onlinearchiv des ENSEMBLES Projektes der Europäischen Union bezogen wurden: <http://ensembles-eu.metoffice.com>. Um die Unsicherheiten in den numerischen Klimamodellen und der damit erstellten Klimaprojektionen zu berücksichtigen, wurde ein

Multi-Modell Ensemble von zehn regionalen Klimaprojektionen, angetrieben mit dem A1B-Emissionsszenario, verwendet. Systematische Abweichungen dieser regionalen Klimamodelle wurden unter Verwendung langjähriger Messwerte (1970-2016) vom Standort Remich bias-korrigiert.

Diese Zeitreihen der bias-korrigierten Klimaprojektionen dienten als Antrieb für (i) das Austriebs-Modell gemäß Molitor et al. (2014a) sowie (ii) das temperatursummenbasierte, hoch-aufgelöste Phänologie-Modell nach Molitor et al. (2014b). Detaillierte Informationen zum Aufbau der beiden Modelle sind der Veröffentlichung von Molitor und Junk (2019) zu entnehmen.

Basierend auf (i) den 10 bias-korrigierten Klimaprojektionen, (ii) dem Austriebs-Modell und (iii) dem Phänologie-Modell wurde für jedes Jahr (1970-2100), jedes Ensemble-Mitglied und jede der drei Rebsorten Riesling, Müller-Thurgau und Spätburgunder auf der VitiMeteo-Plattform der Tag des Jahres (DOY) des Erreichens der 27 phänologischen Stadien nach BBCH-Code (Lorenz et al., 1994) zwischen Austrieb und Erntereife, sowie die Länge der einzelnen Phänophasen berechnet. Eine Phänophase ist definiert als der Zeitraum zwischen

dem DOY des Erreichens eines BBCH-Stadiums und dem Erreichen des Folgestadiums. Für alle drei Rebsorten wurden die durchschnittlichen Daten (30 Jahre x 10 Ensemble-Mitglieder → n = 300) des Erreichens aller BBCH-Stadien in den folgenden Zeitscheiben bestimmt:

- die Referenzperiode (“Vergangenheit”) 1971 bis 1990,
- die “Gegenwart” 2001 bis 2030,
- die “Nahe Zukunft” 2031 bis 2060 und
- die “Ferne Zukunft” 2061 bis 2090.

Weiterhin wurden die folgenden Mitteltemperaturen (jeweils für zehn regionale Klimaprojektionen) ermittelt:

- Jahres- und Monatsmitteltemperaturen
- Vorblüte-Temperatur (Austrieb BBCH 09 bis Blütebeginn BBCH 61)
- Blüte-Temperatur (Blütebeginn BBCH 61 bis Blüteende BBCH 69)
- Nachblüte-Temperatur (Blüteende BBCH 69 bis Reifebeginn BBCH 81)
- Reife-Temperatur (Reifebeginn BBCH 81 bis Erntereife BBCH 89)

Die Datensätze für die Zeitscheiben Gegenwart, Nahe Zukunft und Ferne Zukunft wurden auf signifikante Unterschiede gegenüber der Referenzperiode mittels nicht-parametrischem Mann-Whitney U-test getestet ( $p \leq 0,001$ ).

## Ergebnisse

### Entwicklung der Jahresmitteltemperatur

Abb. 1 zeigt die gemessenen Jahresmitteltemperaturen am Standort Remich, sowie das Multi-Modell-Mittel der zehn Ensemble-Mitglieder (A1B-Emissionsszenario, bias-korrigiert), welche einen signifikanten Anstieg der Jahresmitteltemperaturen in der Zukunft prognostizieren.

### Projizierte Eintrittstermine der phänologischen Entwicklungsstadien

Die vorliegenden Ausführungen fokussieren sich auf die Ergebnisse bei der Rebsorte Riesling. Ergebnisse für die Rebsorten Müller-Thurgau und Spätburgunder sind der Originalveröffentlichung (Molitor and Junk, 2019) zu entnehmen, welche unter

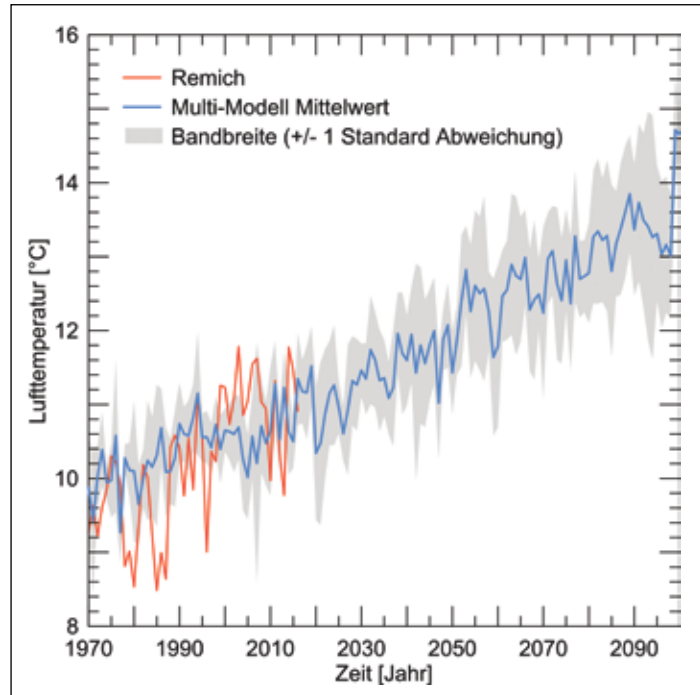


Abb. 1: Beobachtete (rote Linie) sowie projizierte Jahresmitteltemperaturen (A1B-Emissionsszenario; Multi-Modell-Mittelwerte aus zehn Ensemble-basierten regionalen Klimamodellen; blaue Linie) für den Standort Remich im Zeitraum 1970 bis 2100. Die Streuung der Ensemble-Mitglieder (+/- 1 Standardabweichung) ist grau hinterlegt.

folgendem Link kostenfrei abrufbar ist: <https://oeno-one.eu/article/view/2329>.

Die Tage des Jahres (DOY – Day of the Year) des Erreichens aller phänologischen Stadien werden für die Gegenwart, Nahe Zukunft und Ferne Zukunft für alle 27 Stadien früher berechnet als für die Vergangenheit (Tab. 1).

Der Grad der zeitlichen Verfrühung vergrößert sich kontinuierlich von der Gegenwart zur Fernen Zukunft. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Gesamtlänge der Vegetationsperiode BBCH 09 bis BBCH 89 sich in der Zukunft verkürzen wird.

Der projizierte Termin des Austriebs liegt 3 (Gegenwart), 9 (Nahe Zukunft) bzw. 14 (Ferne Zukunft) Tage früher als in der Referenzperiode. Die Auswirkungen dieses früheren Austriebs auf die Spätfrostgefährdung werden in der wissenschaftlichen Literatur kontrovers diskutiert (Kotremba et al. 2014, Molitor et al. 2014a, Kartschall et al.

Tab. 1: Durchschnittliche (10 Ensemble-basierte regionale Klimawandelprojektionen) Termine (Tag des Jahres) des Erreichens der phänologischen Stadien 09 bis 89 im Riesling in den verschiedenen 30-jährigen Zeitscheiben.  $\Delta$  = Differenz (Tage) zur Referenzperiode (Vergangenheit; 1971-2000). Termine desselben BBCH-Stadiums, die signifikant gemäß nicht-parametrischem Mann-Whitney U-test ( $p = 0,001$ ) von der Referenzperiode (1971-1990) abweichen, sind in Fettdruck markiert.

BBCH Stadium	Vergangenheit (1971-2000)	Gegenwart (2001-2030)		Nahe Zukunft (2031-2060)		Ferne Zukunft (2061-2090)	
	DOY	DOY	$\Delta$	DOY	$\Delta$	DOY	$\Delta$
<b>09</b>	116	<b>112</b>	-3	<b>107</b>	-9	102	-14
<b>11</b>	123	<b>120</b>	-3	<b>114</b>	-9	107	-14
<b>12</b>	126	<b>123</b>	-4	<b>118</b>	-9	111	-14
<b>13</b>	129	<b>126</b>	-3	<b>121</b>	-9	114	-13
<b>14</b>	133	<b>130</b>	-3	<b>124</b>	-9	118	-13
<b>15</b>	137	<b>133</b>	-3	<b>128</b>	-9	122	-13
<b>16</b>	141	<b>138</b>	-3	<b>132</b>	-9	125	-13
<b>17</b>	144	<b>141</b>	-3	<b>135</b>	-9	129	-13
<b>18</b>	147	<b>144</b>	-4	<b>138</b>	-9	133	-13
<b>19</b>	150	<b>147</b>	-3	<b>142</b>	-9	136	-13
<b>53</b>	143	<b>139</b>	-3	<b>134</b>	-9	126	-13
<b>55</b>	148	<b>145</b>	-3	<b>140</b>	-9	133	-13
<b>57</b>	159	<b>156</b>	-3	<b>150</b>	-9	145	-13
<b>61</b>	168	<b>164</b>	-4	<b>159</b>	-9	152	-14
<b>63</b>	170	<b>166</b>	-4	<b>160</b>	-9	155	-14
<b>65</b>	172	<b>168</b>	-4	<b>163</b>	-9	156	-14
<b>68</b>	174	<b>171</b>	-4	<b>165</b>	-10	159	-14
<b>69</b>	177	<b>173</b>	-4	<b>167</b>	-10	161	-14
<b>71</b>	179	<b>176</b>	-4	<b>170</b>	-10	163	-15
<b>73</b>	183	<b>179</b>	-4	<b>173</b>	-10	168	-15
<b>75</b>	193	<b>189</b>	-4	<b>183</b>	-10	177	-15
<b>77</b>	198	<b>195</b>	-4	<b>189</b>	-10	184	-15
<b>79</b>	207	<b>203</b>	-4	<b>197</b>	-10	194	-15
<b>81</b>	234	<b>230</b>	-5	<b>224</b>	-11	206	-16
<b>83</b>	238	<b>233</b>	-5	<b>227</b>	-11	210	-16
<b>85</b>	244	<b>238</b>	-5	<b>232</b>	-12	216	-17
<b>89</b>	279	<b>270</b>	-9	<b>259</b>	-20	248	-27

2015, Mosedale et al. 2015, Sgubin et al. 2018). Während Analysen von Molitor et al. (2014a) andeuten, dass das Spätfrostisiko in der Zukunft tendenziell zurückgehen wird, zeigen andere Studien inkonsistente Ergebnisse bzw. deuten ein steigendes Spätfrostisiko an. Diese abweichenden Schlussfolgerungen sind möglicherweise mit den verwendeten phänologischen Austriebsmodellen zu erklären.

Die bereits zum Austrieb (BBCH 09) bestehende zeitliche Differenz zur Referenzperiode bleibt relativ konstant bis zum Beginn der Reifeperiode (Tab. 1). Entsprechend werden für die Zeitscheibe 2001-2030 im Vergleich zur Referenzperiode keine signifikanten Änderungen in der Länge der Phänophasen zwischen BBCH 09 und BBCH 77 errechnet. D.h. der Shift der phänologischen Phasen in Richtung des Jahresbeginns ist vor allem im früheren Austrieb begründet.

Für den praktischen Weinbau bedeutet die relative stabile Länge der phänologischen Stadien vor Reifebeginn, dass die zeitliche Verteilung der Arbeitsbelastung auch in der Zukunft relativ konstant bleiben wird. D.h., da die phänologische Entwicklung in dieser Phase sich, gemäß vorliegenden Untersuchungen, nicht beschleunigen wird, werden z.B. Spritzintervalle und die Länge der Zeitfenster für Laubarbeiten voraussichtlich nicht systematisch beeinflusst.

Die Erklärung für diese zunächst überraschenden Effekte (relativ konstante Phänophasenlängen trotz generellem Temperaturanstieg) ist im Verlauf der mittleren Tagesmitteltemperaturen in den vier Zeitscheiben zu finden.

Abb. 2 zeigt, dass der Temperaturanstieg gegenüber der Referenzperiode im Verlauf des Jahres relativ konstant ist (links). Trägt man jedoch die Tagesmitteltemperatur relativ zum Tag des Austriebs auf, so zeigt sich, dass die Temperaturbedingungen in der Phase rund um den Austrieb (BBCH 09) weitgehend unverändert bleiben (Abb. 2; rechts).

Diese vergleichbaren Lufttemperaturen in der Austriebsphase führen dazu, dass sich die Länge der Phänophasen hier kaum ändern, sondern lediglich die Entwicklung in Richtung des Beginns des Jahres verschoben wird.

Im Gegensatz hierzu zeigen die Berechnungen eine signifikante Verkürzung der Phänophase 85 (Zeitraum zwischen BBCH 85 und BBCH 89) (Tab. 1).

### Temperaturbedingungen in den verschiedenen Phänophasen

Die projizierten Jahres- und Monatsmitteltemperaturen (Ausnahmen: Januar, Mai, Oktober, Dezember) liegen bereits in der Gegenwart signifikant höher als in der Referenzperiode. In der Nahen sowie in der Fernen Zukunft werden den vorliegenden Berechnungen nach die mittlere Jahres- sowie alle Monatstemperaturen höher liegen als in der Referenzperiode. Dabei liegt der berechnete Anstieg der Jahresmitteltemperatur im Vergleich zur Referenzperiode bei 0,5°C (Gegenwart) 1,5°C (Nahe Zukunft) und 2,6°C (Ferne Zukunft) (exakte Daten: siehe Molitor et al. (2019).

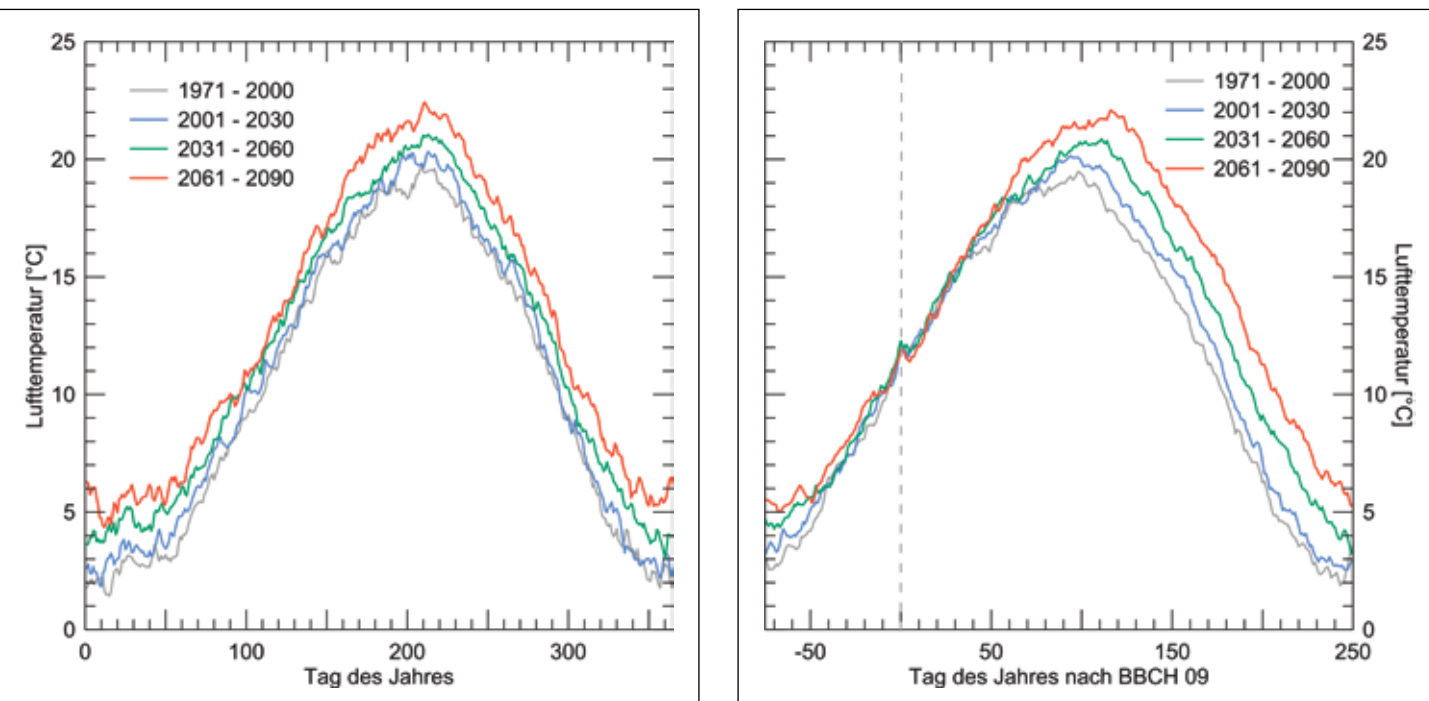


Abb. 2: Tagesmitteltemperaturen in den vier Zeitscheiben (Vergangenheit: 1971-2000; Gegenwart: 2001-2030; Nahe Zukunft: 2031-2060; Ferne Zukunft: 2061-2090) (i) relativ zum 01.01. (Tag des Jahres - DOY; links) und (ii) relativ zum Austriebstermin (BBCH 09; rechts).

In Folge der Verfrühung des Austriebstermins in Richtung des früheren, meist kühleren Frühjahres, zeigen die berechneten Vorblüte-Temperaturen keine signifikanten Unterschiede zwischen der Referenzperiode und den weiteren Zeitscheiben. In Konsequenz bedeutet dies, dass die hauptsächlich temperaturabhängigen physiologischen Prozesse zwischen Austrieb und Blüte, wie z.B. die Differenzierung der Gescheine und die Initiation der Einzelblüten (Keller 2015, Molitor and Keller 2016)) trotz steigender Frühjahrstemperaturen voraussichtlich nicht systematisch vom Klimawandel beeinflusst werden.

Dagegen liegen die berechneten Nachblüte- und Reifephase-Temperaturen in der Gegenwart, Nahen sowie Fernen Zukunft signifikant über denen der Referenzperiode. Hierbei ist der Anstieg in der Reifephase am stärksten ausgeprägt. Für die Rebsorte Riesling wird ein Temperaturanstieg im Vergleich zur Referenzperiode von 1,3°C (Gegenwart), 3,2°C (Nahe Zukunft) bzw. 5,1°C (Ferne Zukunft) erwartet (Abb. 3).

In der Nahen Zukunft ist der erwartete Temperaturanstieg in der Reifephase beim Riesling 2,1-mal höher (+3,2°C) als der erwartete Anstieg der Temperaturen im Gesamtmonat September (+1,5°C). Dieses Phänomen ist das Ergebnis der Kombination zweier Effekte: (i) dem generellen Temperaturanstieg sowie (ii) dem Shift der Reifephase in Richtung einer früheren, in der Regel wärmeren Phase des Jahres.

Dieser ausgeprägte Temperaturanstieg in der Reifephase lässt einen deutlichen Effekt auf die Weintypizität erwarten. So führen höhere Reifetemperaturen unter anderem zu Änderungen im Aromaprofil der erzeugten Weine (Trought et al., 2015) und einem beschleunigten Äpfelsäureabbau (Duchene et al., 2010). Die zu erwartenden höheren Zuckergehalte der Trauben haben höhere Alkoholgehalte im Wein zur Folge. Beide vorgenannten Effekte gefährden die Frische und Leichtigkeit, die besonders für Weißweine aus den (vormaligen) Cool Climate-Weinbaugebieten, wie z.B. in Mitteleuropa, stilprägend sind. Um die Typizität einer Weinbauregion zu erhalten, könnten praktische Anpassungsstrategien, z.B. Maßnahmen zur Reifeverzögerung und damit zum Verschieben der Reifephase in kühlere Perioden des Jahres beinhalten. Die könnte durch (i) ein Ausweichen auf kühlere (z.B. aufgrund der Höhenlage oder

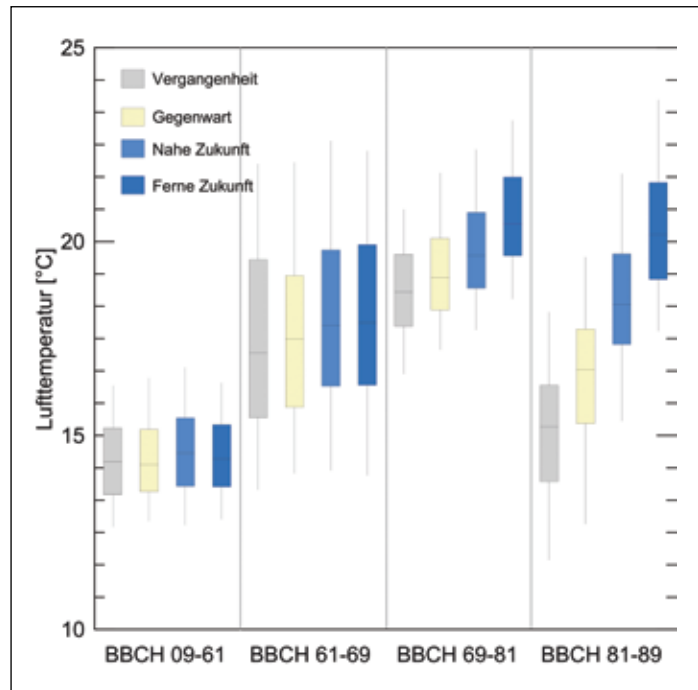


Abb. 3: Durchschnittliche (10 Ensemble-basierte regionale Klimawandelprojektionen) Vorblüte- (BBCH 09-61), Blüte- (BBCH 61-69), Nachblüte- (BBCH 69-81) und Reifephase- (BBCH 81-89) Temperaturen im Riesling in den verschiedenen 30-jährigen Zeitscheiben. \* = Temperaturen derselben Phase unterscheiden sich signifikant von denen in der Referenzperiode (1971-2000).

der Exposition) Standorte oder nördlichere Anbauregionen, (ii) Rebsorten oder Klone mit einer späteren Reifecharakteristik, (iii) reiferverzögernde Unterlagen oder (iv) spezifische Kulturmaßnahmen inklusive Erziehungssysteme (Molitor et al., 2019), verspätetem Winterschnitt (Friend and Trought, 2007) und eine Anpassung der Laubwandpflege (Parker et al., 2016; Stoll et al., 2013; Trought et al., 2015) realisiert werden.

## Fazit

Gemäß vorliegender Analysen wird unter den Bedingungen des luxemburgischen Moseltals jede einzelne der 27 phänologischen Entwicklungsstadien nach BBCH-Code in der Zukunft früher im Jahr eintreten als in der Vergangenheit. Während signifikante Änderungen in der Länge der Phasen in den frühen Entwicklungsstadien fehlen, verkürzt sich nach vorliegenden Projektionen die Länge der Reifephase signifikant. Aufgrund (i)

des projizierten generellen Temperaturanstieges und (ii) des Verschiebens des Zeitraums der Reifephase in Richtung einer früheren (und damit in der Regel wärmeren) Phase des Jahres, impliziert der Klimawandel einen zweifachen Anstieg der Temperaturen in der Reifephase. Als Konsequenz ist der zu erwartende Anstieg der Temperaturen in der Reifephase (Ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode in der Rebsorte Riesling: + 5,1°C) deutlich stärker ausgeprägt als im Jahresmittel (+2,6°C). Dieser signifikante Anstieg der Reife-Temperaturen lässt eine Veränderung der Weintypizität der traditionellen Weinbauregionen erwarten und erfordert voraussichtlich spezifische Anpassungsmaßnahmen.

Daniel Molitor  
Jürgen Junk

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST),  
"Environmental Research and Innovation (ERIN)"  
Department

41, rue du Brill, L-4422 Belvaux, Luxemburg  
daniel.molitor@list.lu

Tel.: 00352 275 888 5113

## Danksagung

Die Autoren danken dem Institut Viti-Vinicole, Remich für die Bereitstellung der historischen meteorologischen und phänologischen Daten sowie für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes "TerroirFuture – Einfluss des Klimawandels auf den Weinbau in Luxemburg – Risikoanalyse und potentielle Anpassungsstrategien", B. Augenstein und R. Krause (Geosens Ingenieurpartnerschaft, Schallstadt) für die Läufe des Phänologiemodells auf der VitiMeteo-Plattform, sowie der Europäischen Union für die Förderung des Forschungsprojektes „Clim4Vitis“ (Horizon 2020 research and innovation programme; grant agreement No. 810176).

## Referenzen

- Duchene, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C. and Merdinoglu, D., 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41(3): 193-204.
- Friend, A.P. and Trought, M.C.T., 2007. Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3): 157-164.
- Lorenz, D.H. et al., 1994. Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala. *Wein-Wissenschaft, Wiesbaden* (49): 66-70.
- Molitor, D. et al., 2014a. Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: a case study for the Luxembourgish winegrowing region. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(1): 160-168.
- Molitor, D. and Junk, J., 2019. Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region Oeno One, 53(3).
- Molitor, D., Junk, J., Evers, D., Hoffmann, L. and Beyer, M., 2014b. A high resolution cumulative degree day based model to simulate phenological development of grapevine. *American Journal of Enology and Viticulture*, 65(1): 72-80.
- Molitor, D. et al., 2019. Semi-minimal pruned hedge: a potential climate change adaptation strategy in viticulture. *Agronomy*, 9: 173.
- Parker, A.K. et al., 2016. Reduced grapevine canopy size post-flowering via mechanical trimming alters ripening and yield of 'Pinot noir'. *Vitis*, 55(1): 1-9.
- Stoll, M., Bischoff-Schaefer, M., Lafontaine, M., Tittmann, S. and Henschke, J., 2013. Impact of various leaf area modifications on berry maturation in *Vitis vinifera* L. cv. Riesling. *Acta Horticulturae*, 978: 293-299.
- Trought, M.C.T., Parker, A. and Van Leeuwen, C., 2015. Can a change in vineyard practice mitigate warming due to climate change? *Acta Horticulturae*, 1082: 397-402.