

Die Wirkung atmosphärischer Stickstoffdeposition auf drei alpine Vegetationstypen

Vertrags-Nr. 16.0095.PJ / Q171-0270

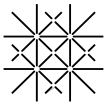
Projektleitung: Dr. Erika Hiltbrunner, Prof. Dr. Ansgar Kahmen
Botanisches Institut, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel

**Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
3003 Bern**

Begleitung: Dr. Reto Meier, BAFU

Bericht 2020

Verantwortlich: Dr. Erika Hiltbrunner



Bericht 2020

Zielsetzung des Projektes

- Überprüfung der empirischen „critical loads für Stickstoff“ in drei verschiedenen alpinen Pflanzengemeinschaften durch experimentelle N-Gaben
- Besseres Prozessverständnis über die Empfindlichkeit von alpinen Pflanzengemeinschaften und Pflanzenarten gegenüber erhöhten atmosphärischen Stickstoffeinträgen (durch Analyse von Diversitätsindices, Biomasseallokation und ökophysiologischen Messgrößen [inkl. $\delta^{15}\text{N}$ und $\delta^{13}\text{C}$ Isotope])

Wissensstand und Problemstellung

Atmosphärische Stickstoffeinträge

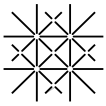
Nebst Veränderungen in der Landnutzung und durch den Klimawandel werden heute erhöhte Raten an atmosphärischen Stickstoffeinträgen und die Überschreitungen der kritischen Grenzwerte (Exceedance) als die wichtigsten Ursachen von Veränderungen im Artenspektrum von Pflanzengemeinschaften und von Verlusten an Arten in (semi-) natürlichen Ökosystemen angesehen (Sala et al. 2000, Phoenix et al. 2006, Bobbink et al. 2010, Dise et al. 2011, Roth et al. 2013). Eine erhöhte Stickstoffdeposition führt zu einer Trivialisierung der Flora mit unausweichlichen Folgen für die Fauna und Ökosystemleistungen (Erosionsschutz, sauberes Wasser, etc.).

Allerdings bestehen nach wie vor Wissenslücken zur Wirkung von relativ tiefen Stickstoffdepositionsraten auf naturnahe, siedlungserne Lebensräume (Hettelingh et al. 2011, Southon et al. 2013). Das hier vorgeschlagene Projekt will durch die empirische Überprüfung der „critical N loads“ beitragen, den Wissensstand über wirkungsbasierte Effekte von erhöhten Stickstoffeinträgen auf alpine Grasländer zu verbessern. Nach bisherigem Wissen dürfte die atmosphärische Stickstoffdeposition in den Hochalpen neben der Veränderung der Schneelage das grösste „global change Risiko“ für die Biodiversität darstellen.

Atmosphärischer Stickstoffeintrag an den alpinen Standorten Furka und Tiefenbach (Zentralalpen)

Die Bestimmung der aktuellen N-Einträge (Bulkdeposition) an den alpinen Standorten Furka (2440 m ü M) und Tiefenbach (2127 m ü M) wurden 2020 fortgesetzt (Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle für Umweltbeobachtung FUB). Das Sammelintervall betrug während der Sommermonate 14 Tage, im Winter möglichst monatlich (je nach Schneelage und Lawinenrisiko). Obwohl sich am Standort Tiefenbach keine Versuchsflächen der Stickstoffexperimente befinden, wurde Tiefenbach als Messstandort beibehalten, weil die Erreichbarkeit der Furka im Winter eingeschränkt sein kann.

An beiden alpinen Standorten befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den Bulksammlern eine vollautomatische Wetterstation (Furka: ALPFOR Wetterstation; Tiefenbach: Monitron AG, Altdorf). Die Messwerte der Stationen stehen dem Projekt zur Verfügung.



Witterungsbedingungen in den Vorjahren und 2020

Die Ergebnisse der Vorjahre zeigten einen starken Einfluss der Witterungsbedingungen auf die Entwicklung der alpinen Vegetation auf. Diese Witterungsschwankungen wirken sich bei den kurzen Wachstumsperioden im Hochgebirge überproportional auf die Empfindlichkeit gegenüber den Stickstoffgaben aus.

Die Witterungsbedingungen Jahre 2013-2020 in Stichworten:

2013: rel. grosse Schneemengen im Mai, später Start der Vegetationsperiode

2014: nass-kalter Sommer

2015: warm-heisser Sommer mit Welkeerscheinungen an einzelnen Pflanzenarten

2016: Frostereignisse mitten in der Wachstumsperiode (während der letzten 15 Jahre im Furkagebiet nicht beobachtet)

2017: äusserst schneearmer Winter 2016/2017 mit einem aussergewöhnlich frühen Start der Wachstumsperiode (ca. 3 Wochen früher). September 2017 war hingegen gekennzeichnet durch winterliche Verhältnisse im Furkagebiet.

2018: Der Spätwinter 2018 zeichnete sich durch überdurchschnittliche Schneemengen im Furkagebiet aus. Durch den warmen und trockenen Juni startete die Wachstumsperiode ungefähr zeitgleich wie in den Jahren 2014–2016. Das warme und aussergewöhnliche trockene Wetter setzte sich den ganzen Sommer bis in den Spätherbst fort. Eine Regenmenge von nur 59 mm im Monat Juni stellt ein bisher nicht beobachtetes Rekorddefizit dar, die Regensumme der Monate Juni bis August war mit 243 mm deutlich unterdurchschnittlich (Periode für das Wachstum alpine Pflanzen ausschlaggebend). In den Hitzesommern 2003 (noch keine automatische Wetterstation Furka/ALPFOR vorhanden) und 2015 wurden allerdings höhere Temperaturmaxima als 2018 gemessen.

2019: Relativer später Start der Wachstumsperiode aufgrund grosser Schneemengen im Juni. Im Juni überschritt die Lufttemperatur erstmalig auf der Furka die 20 °C Marke (Lufttemperatur von 20.43 °C am 26. Juni 2019 um 15:00h). Auch an anderen, höher gelegenen Messstationen wurden neue Temperaturrekorde für Juni gemessen: auf dem Säntis (2501 m) stieg das Tagesmaximum am 26.6. auf den Rekord von 21 °C (Rekord seit 1901). Die warmen Temperaturen im Juni hatten zur Folge, dass sich die Pflanzen an Standorten mit frühem Beginn der Vegetationsperiode (Violettsschwingelrasen) unter diesen warmen Temperaturen schon deutlich entwickelten während Pflanzen an anderen Standorten (z.B. Borstlingsrasen) zu diesem Zeitpunkt noch unter Schnee lagen.

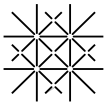
2020: Geringe Schneedecke im Spätwinter, heftige Stürme im Januar und warme Temperaturen im April und Mai 2020 führten zu untypischen Schneeschmelzmustern (vor der eigentlichen Wachstumsperiode). Exponierte Süd- und Südwesthänge waren im Furkagebiet im April bereits schneefrei. Der Monat Juni (üblicher Beginn der Wachstumsperiode) war eher kühl mit wiederholten Schneefällen. Der Monat Juli zeigte sich ebenfalls wechselhaft. Typisches Hochsommerwetter stellte sich erst gegen Ende Juli ein.

Die Messwerte der Wetterstation Furka illustrieren die grosse Variabilität der Witterungsbedingungen während der letzten Jahre bzw. während der Wachstumsperioden (siehe Anhang Tab. 1), die Pflanzen erleben während der Wachstumsperiode aber aufgrund ihrer Statur ein von der Atmosphäre entkoppeltes Mikroklima (Körner & Hiltbrunner 2018).

Die untersuchten **drei alpinen Vegetationstypen** werden hier nochmals kurz vorgestellt:

(1) *Caricion curvulae*; verwendete Bezeichnung „Curvuletum“, charakteristischer Krummseggenrasen aller zentralalpiner Silikatböden. Eine eher artenarme (20-30 Arten pro 100 m²) Pflanzengesellschaft der späten Sukzession mit Boden-pH(CaCl₂) zwischen 3.0-3.5. Die Krummsegge *Carex curvula* dominiert diese Pflanzengesellschaft.

(2) *Nardion*; Bezeichnung „Nardetum“, dt. Borstgrasrasen. Eine Übergangsv egetation zwischen Nardetum und Curvuletum mit schwachem Karbonateinfluss (pH CaCl₂ ca. 3.5) und etwas höherer Pflanzendiversität (ca. 30 Arten pro 100 m²). Dominierende Arten sind *Nardus stricta* und *Carex curvula*.



(3) *Laserpition-Poion violacae*; Bezeichnung "Festucetum", dt. Violettschwingelrasen. Versuchsflächen im Violettschwingelrasen mit hoher Artendiversität (>60 Pflanzenarten pro 100-150 m²), einschliesslich dem Vorkommen der Roten Liste-Art *Dracocephalum ruyschiana*. Boden pH (CaCl₂) 4.0-4.2. Säurezeigende Pflanzenarten kommen teilweise in unmittelbarer Nähe von Kalkzeigern vor (äolische Karbonat-Verfrachtung). Dominierende Grasarten sind *Festuca violacea*, andere *Festuca*-Arten und *Carex sempervirens*.

Die drei alpinen Pflanzengemeinschaften unterscheiden sich in den Bodeneigenschaften, in der Anzahl der Pflanzenarten und in der Produktivität (Biomasseproduktion im Curvuletum ca. 200 g m⁻², im Festucetum 350-400 g m⁻²). In entwickelten Böden (Curvuletum) können erhöhte Stickstoffeinträge zu einer Phosphorlimitierung führen (siehe Niinemets & Kull 2005), deshalb wird in dieser Pflanzengemeinschaft zusätzlich die Wechselwirkung mit Phosphor untersucht (14 zusätzliche „N+P-Plots“).

N-Versuchsflächen in den drei alpinen Vegetationstypen

Die Versuchsflächen in den drei alpinen Vegetationstypen umfassen insgesamt 98, dauerhaft markierte Flächen (Einzelfläche 0.5m², n=7 pro N-Gabe bzw. pro N+P Gabe).

Stickstoff- und Phosphor-Applikationen

Die Applikation der verschiedenen N-Mengen zur Simulation erhöhter Stickstoffeinträge wurde jeweils anfangs der Wachstumsperiode der alpinen Pflanzen in allen drei alpinen Vegetationstypen durchgeführt.

Die applizierten N-Mengen (in 0.6 L Reinstwasser gelöstes Ammoniumnitrat) entsprachen einer Gabe von 5 kg, 10 kg und 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Die Kontrollflächen erhielten die gleiche Menge an Reinstwasser. In der Pflanzengemeinschaft Curvuletum wurden in 14 Versuchsflächen Phosphor zusammen mit Stickstoff ausgebracht. Phosphor wird in Form von gelöstem Natriumdihydrogenphosphat-1-hydrat zusammen mit dem Ammoniumnitrat appliziert (entsprechend den Mengen: 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ plus 5 kg P ha⁻¹ a⁻¹ und 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ plus 5 kg P ha⁻¹ a⁻¹). Da im Vegetationstyp Curvuletum 2019 keine Biomasseproben entnommen wurde, wurde die N-Applikation bis und mit 2020 fortgesetzt.

Vegetationsbeschreibung

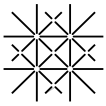
Vegetationsbeschreibungen (mit Hilfe eines Rasterrahmens von 48 x 48cm, unterteilt in 9 Unterflächen à 16 x 16 cm) wurden in den Jahren 2013 bis 2018 durchgeführt. Die letzte Vegetationsbeschreibung wurde im Violettschwingelrasen (Festucetum; 28 Flächen) und im Borstlingsrasen (Nardetum, 28 Flächen) 2018 durchgeführt. Aufgrund der ausgeprägten Trockenheit erfolgte 2018 keine Aufnahme im Krummseggenrasen (Curvuletum; 42 Flächen). Die Ernteaktivitäten im Festucetum und Nardetum konnten erst spät in der Saison 2019 beendet werden, zu einem Zeitpunkt, welcher keine Vegetationsaufnahmen noch Ernteaktivitäten mehr im Curvuletum erlaubten (fortgeschrittene Alterung der Pflanzen). Die Vegetationsbeschreibung im Curvuletum wurde deshalb vor der Ernte 2020 durchgeführt.

Blattlänge als Proxy für Blattwachstum

Ähnlich wie 2016 wurden in allen drei Vegetationstypen 2018 Blattlängen bei den stetigsten Pflanzenarten gemessen (Gras- und Krautarten). Das erlaubt einerseits den Einfluss des Trockensommers 2018 auf das Blattwachstum im Vergleich zum Jahr 2016 zu analysieren und andererseits die Reaktion der verschiedenen Pflanzenarten auf die experimentellen N-Gaben zu testen. Zusätzlich wurden Blattlängen im Krummseggenrasen im Jahr 2019 gemessen.

Ernteaktivitäten 2019 und 2020

Die Durchführung der Erntetätigkeiten im Festucetum und Nardetum waren die Hauptaktivitäten im Sommer 2019. Die Ernte im Curvuletum (inkl. Vegetationsbefundung) die Hauptaktivität im Sommer und



Herbst 2020. Die Aufarbeitung der verschiedenen Pflanzenproben ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

Oberirdische Biomasse (g m^{-2}):

Für die Bestimmung der oberirdischen Biomasse wurde die stehende Phytomasse in zwei Unterflächen ($16 \times 16 \text{ cm}$) pro einzelne Untersuchungsfläche geerntet. Diese Unterflächen stimmen mit den Unterflächen bei der Vegetationsbefundung überein und die Daten können zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die Phytomasse setzt sich aus Biomasse und Nekromasse zusammen. Streu bezeichnet das von der stehenden Phytomasse abgefallene, tote Pflanzenmaterial und wurde hier nicht berücksichtigt (Alter der Streu nicht genau bestimmbar). Die Biomasse wurde für jede vorkommende Art einzeln sortiert, die Nekromasse für die beiden funktionellen Gruppen „Kräuter“ und „Graminoide“ (Süss- und Sauergräser gepoolt); anschliessend wurden die Pflanzenproben bei 80°C getrocknet. Die Sortierung des geernteten Pflanzenmaterials (Biomasse) auf Artebene ist aufwändig, erlaubt aber, die Biomasse von ähnlichen Pflanzenarten (z. Bsp. gleiche Gattungen) zusammenzufassen oder/und in sogenannte funktionelle Gruppen einzuteilen.

Da einzelne Pflanzenproben relativ leicht sind, wurden Pflanzenproben auf einer präzisen Waage am Botanischen Institut in Basel gewogen. Vor der Bestimmung des Trockengewichtes wurden die Pflanzenproben nachgetrocknet.

Unterirdische Biomasse (g m^{-2}):

Auf den gleichen beiden Unterflächen für die oberirdische Biomasse wurden Bodenproben zur Bestimmung der unterirdischen Biomasse entnommen. Pro einzelne Unterfläche wurden vier Bohrkerne à 100 cm^3 entnommen, zwei in einer Bodentiefe von $0\text{-}5 \text{ cm}$ und zwei von $5\text{-}10 \text{ cm}$ (pro Bodenhorizont gepoolt). Die Bodenproben wurden nach der Entnahme eingefroren und bis zur Weiterverarbeitung zwischen -18 und -20°C gelagert.

In den Bodenproben werden alle Wurzeln herausortiert, in Feinst- und Grobwurzeln/Rhizome sortiert, gewaschen, bei 80°C getrocknet und gewogen. Da die Wurzelmasse in alpinen Pflanzengemeinschaften ein Mehrfaches der oberirdischen Biomasse entspricht, ist das Herausortieren und Reinigen der Wurzeln ein ausserordentlich arbeitsintensiver Prozess. Der Boden wird nach dem Herausortieren der Wurzeln anschliessend gesiebt und bis zur weiteren Analyse gefroren gelagert.

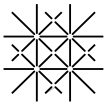
Durch die Beprobung der gleichen Unterflächen, kann die oberirdische und unterirdische Biomasse zueinander direkt in Beziehung gesetzt werden.

Zusätzlich Biomasseproben von ausgewählten Arten (oberirdische Biomasse)

Da in den beiden Unterflächen pro Untersuchungsfläche auch relativ häufigere Pflanzenarten nicht wiederholt vorkommen, wurden von bestimmten Pflanzenarten (Kräutern) 5 Individuen pro Untersuchungsfläche (0.5 m^2) einzeln geerntet (Tabelle 1). Aufgrund der Wuchsform (Horstbildung) ist bei Graminoiden das Individuum schwierig abgrenzbar, hier wurde deshalb als Einheit der einzelne, vegetative Spross (engl. Tiller) gewählt. Pro Untersuchungsfläche wurden 5 oberirdische Tiller geerntet und getrocknet. Sowohl mehr als auch längere Blätter (unter N-Gabe) sollten zu höheren Trockengewichten der Sprosse führen.

Bei den krautigen Einzelarten wurden vor dem Trocknen zusätzliche Parameter erfasst: Anzahl Blätter, Blattdicke und Blattfläche. Nach dem Wägen wird aus Blattfläche und Blattdicke die spezifische Blattfläche (SLA) ermittelt. SLA korreliert in vielen Pflanzenarten positiv mit der N-Konzentration in den Blättern (und negativ mit der Lebensdauer der Blätter). Wie gross die innerartliche Variabilität der SLA Werte bei den ausgewählten alpinen Krautarten unter N-Gabe ist, ist bisher unbekannt.

Für die Bestimmung der Biomasseallokation für ausgewählte Einzelarten war gleichzeitig zur Ernte der oberirdischen Biomasse die Entnahme der unterirdischen Pflanzenorgane geplant. Allerdings war diese



Entnahme aufgrund der trockenen Bodenverhältnisse im Violettschwingelrasen und wegen der starken Durchwurzelung im Oberboden auch im Borstlingsrasen nicht realisierbar. Vorversuche im Feld ergaben, dass die unterirdischen Pflanzenorgane pro Individuum trotz vorsichtigen Grabversuchen abgerissen werden oder die Grabaktivitäten so invasiv sein müssen, dass andere Pflanzenarten auf der gleichen Untersuchungsfläche nicht mehr beprobt werden können. Deshalb wurde in drei Pflanzengemeinschaften auf eine Entnahme von unterirdischen Organen pro Einzelart verzichtet.

Tabelle 1: Zusätzliche Ernte von Einzelarten (oberirdische Biomasse):

Funktionelle Gruppe	Violettschwingelrasen	Borstlingsrasen	Krummseggenrasen
Graminoide («Tillierernte»)	<i>Carex sempervirens</i>	<i>Carex curvula</i>	<i>Carex curvula</i>
	<i>Anthoxantum alpinum</i>	<i>Anthoxantum alpinum</i>	<i>Anthoxantum alpinum</i>
	<i>Helictotrichon versicolor</i>	<i>Helictotrichon versicolor</i>	<i>Helictotrichon versicolor</i>
	<i>Festuca violacea</i>	<i>Nardus stricta</i>	
	<i>Festuca nigrescens</i>		
Kräuter	<i>Arnica montana</i>		
	<i>Aster alpinus</i>		
	<i>Campanula barbata</i>	<i>Campanula barbata</i>	<i>Campanula barbata</i>
	<i>Hypochaeris uniflora</i>	<i>Leontodon helveticus</i>	<i>Leontodon helveticus</i>
	<i>Potentilla grandiflora</i>	<i>Potentilla aurea</i>	<i>Potentilla aurea</i>
	<i>Pulsatilla vernalis</i>	<i>Trifolium alpinum</i>	<i>Trifolium alpinum</i>

Aufgrund des relativ grossen Zeitaufwandes bei der Ernte im Violettschwingel- und Borstlingsrasen im Feld (total 56 Untersuchungsflächen), wurde die Ernte im Krummseggenrasen (42 Untersuchungsflächen) im Sommer 2020 durchgeführt. Die Auswahl der Einzelarten im Krummseggenrasen (mit Ausnahme von *Nardus stricta*) entsprach derjenigen im Borstlingsrasen.

Stand der Auswertungen 2020

Vegetationsbefundungen

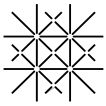
Alle Befundungen aus den Vegetationsaufnahmen wurden digitalisiert. Der Datensatz der Vegetationsbeschreibung umfasst bei Ansprache aller drei Vegetationseinheiten, pro Jahr 882 Vegetationsaufnahmen, die Daten- und Fehlerkontrolle des Gesamtdatensatzes gestaltete sich als sehr zeitintensiv. Die letzte Vegetationsbefundung im Curvuletum 2020 konnte bereits digitalisiert werden. Die Gesamtauswertung über alle Jahre und alle drei Vegetationstypen ist derzeit noch in Bearbeitung.

Oberirdische Phytomasse, Biomasse und Nekromasse (g m^{-2})

Von allen drei alpinen Vegetationstypen liegen die ersten Auswertungen der oberirdischen Phytomasse (Summe der Biomasse und stehende Nekromasse) vor. Die beiden geernteten Unterflächen pro Untersuchungseinheit wurden für die weitere Analyse (Biomasse, Nekromasse, funktionelle Gruppen, Einzelarten) gemittelt.

Die Phytomasse war in den Kontrollflächen (ohne zusätzliche N-Gabe, $n=7$) im Borstlingsrasen mit $329.5 \pm 66.8 \text{ g m}^{-2}$ leicht höher (Mittelwert \pm sd) als im Violettschwingelrasen ($307.3 \pm 35.1 \text{ g m}^{-2}$) und im Krummseggenrasen ($289.9 \pm 44.2 \text{ g m}^{-2}$). Hingegen war im Violettschwingelrasen die Nekromasse mit $34.1 \pm 6.6 \text{ g m}^{-2}$ tiefer als in den beiden anderen Vegetationstypen (Nardetum: $55.0 \pm 19.6 \text{ g m}^{-2}$ und Curvuletum $82.6 \pm 23.6 \text{ g m}^{-2}$).

Entsprechend war auch die Biomasse im Curvuletum mit $207.3 \pm 32.8 \text{ g m}^{-2}$ tiefer als in den anderen beiden Vegetationstypen (Festucetum $273.2 \pm 31.1 \text{ g m}^{-2}$; Nardetum $274.5 \pm 56.0 \text{ g m}^{-2}$). Ursprünglich wurde



die höchste Biomasseproduktion im Festucetum und ein weit geringere Biomasseproduktion im Nardetum und Curvuletum angenommen.

Stickstoffbedingte Veränderungen in der oberirdischen Pflanzenmasse Violettschwingelrasen (Festucetum)

Mit zunehmender N-Gabe ($5\text{-}20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) nahm die Phytomasse im Violettschwingelrasen zu ($P < 0.01$). Diese Zunahme wird vor allem durch eine Zunahme in der Biomasse ($P < 0.001$)[#] und eine statistisch nicht signifikante Zunahme in der Nekromasse erklärt ($P = 0.129$; Abb. 1). Wird bei der Nekromasse zwischen Nekromasse von Krautarten und Nekromasse aller Graminoiden (inkl. Seggen) unterschieden, so nahm insbesondere die Graminoid-Nekromasse mit zunehmender N-Gabe signifikant zu ($P < 0.01$).

Bei der Betrachtung der Biomasse der funktionellen Gruppen (Seggen, Graminoide ohne Seggen, Kräutern, etc.) fällt auf, dass keine der funktionellen Gruppen massgeblich zur Biomassezunahme beigetragen hat. Schwache, positive Trends zu sind vor allem in der funktionellen Gruppe der Kräuter und der Segge *Carex sempervirens* zu verzeichnen (Kräuter $P = 0.090$; Segge $P = 0.160$). Die Segge *Carex sempervirens* war im Festucetum die einzig stetig vorkommende Seggenart.

Auf Artebene zeigte die Grasart *Anthoxanthum alpinum* einen Trend zur N-bedingte Zunahme ($P = 0.060$) in der Biomasse.

Borstlingrasen (Nardetum)

Auch im Borstlingrasen nahm die Phytomasse ($P = 0.103$), die Biomasse ($P = 0.198$) und die Nekromasse (0.089) unterzunehmender N-Gabe tendenziell zu (Abb. 1). Entsprechend wie im Violettschwingelrasen war die Zunahme in der Nekromasse vor allem auf die Zunahme der Graminoid-Nekromasse ($P = 0.059$) und nicht der Kräuter-Nekromasse ($P = 0.958$) zurückzuführen.

Vor allem die Biomasse der Seggen ($P = 0.054$) und die Gruppe der Graminoiden (ohne Seggen; $P = 0.089$) trugen zur Zunahme der Biomasse unter N-Gabe bei. Die Biomasse in der funktionellen Gruppe der Kräuter reduzierte sich tendenziell mit zunehmender N-Gabe.

Bei den Einzelarten zeigten die beiden Grasarten *Anthoxanthum alpinum* ($P < 0.05$) und *Nardus stricta* ($P = 0.076$) N-bedingte Zunahmen in der Biomasse. Die Biomasse der im Borstlingrasen häufigen Segge *Carex curvula* nahm ebenfalls tendenziell zu ($P = 0.065$).

Krummseggenrasen (Curvuletum)

Die N-Gaben von $5\text{-}20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wurden im Krummseggenrasen durch kombinierte N + P Gaben erweitert ($5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $10 \text{ kg, } 20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; insgesamt 42 Versuchseinheiten).

Ohne zusätzliche P-Gaben zeigte die Phytomasse ($P = 0.318$), die Biomasse ($P = 0.146$) und die Nekromasse ($p = 0.916$) durch die N-Gabe keine statistisch signifikanten Veränderungen (Abb. 1).

Entsprechend fielen die Biomasseveränderungen in den funktionellen Gruppen mit zunehmender N-Gabe ebenfalls nicht statistisch signifikant aus. Auch auf dem Niveau der Einzelarten waren die Biomasseveränderungen unter N-Gabe schwach ausgeprägt (statistisch nicht signifikant); so bei den Einzelarten *Anthoxanthum alpinum* ($P = 0.164$) und der Segge *Carex curvula* ($P = 0.219$), beide reagierten in den anderen Vegetationstypen stärker auf die N-Gaben (siehe Festucetum und Nardetum).

[# Statistische Angaben beziehen sich auf statistische Modelle mit wurzeltransformierten Werten]

Unter zusätzlicher N+P-Gabe ($n=42$) nahm die Biomasse tendenziell zu ($P=0.085$). Bei den funktionellen Gruppen Hainsimsen/Binsen ($P<0.001$) sowie bei Seggen ($P=0.083$) wurde die stärkste Biomassezunahme bei einer N+P-Zugabe von $20+5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ beobachtet. Hingegen nahm die Biomasse bei den N_2 fixierenden Kräutern mit zunehmender N+P Gabe ab ($P<0.01$). Da sich die Seggen und die N_2 fixierenden Kräutern in diesem Vegetationstyp aus je einer Art zusammensetzen, nämlich aus *Carex curvula* und *Trifolium alpinum*, entspricht dies auch den Biomasseveränderungen der Einzelarten. Die Biomassezunahme bei den Hainsimsen/Binsen wurde vor allem durch die Reaktion der Hainsimse *Luzula lutea* erklärt ($P=0.015$), welche unter N+P Gabe von $20+5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine höhere Biomasse aufwies.

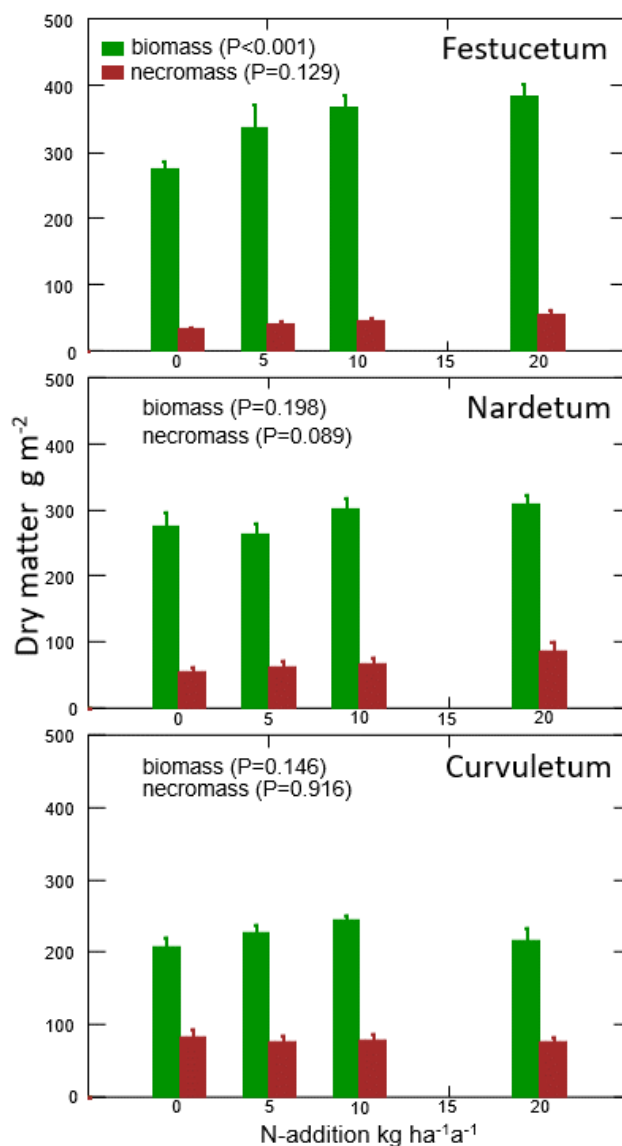
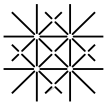


Abb. 1 Oberirdische Biomasse und Nekromasse (in g m^{-2}) in den drei alpinen Vegetationstypen (Mittelwerte \pm se)



Unterirdische Biomasse (g m^{-2})

Hier liegen erste Angaben über die Wurzelmasse für den Violettschwingel- und den Borstlingsrasen vor. Die Wurzelsortierung im Krummseggenrasen wird voraussichtlich noch bis in die Wintermonate dauern.

Die Gesamtwurzelmenge, inklusiv Rhizome/Grobwurzeln (bis 10 cm Bodentiefe) betrug sowohl im Violettschwingelrasen mit $1335.9 \pm 167.5 \text{ g m}^{-2}$ (Mittelwerte \pm sd, Flächen ohne N-Gabe) wie auch im Borstlingsrasen mit $1431.2 \pm 183.4 \text{ g m}^{-2}$ rund das 5-fache der oberirdischen Biomasse!

Den grössten Anteil machten dabei die Fein- und Feinstwurzeln aus (Wurzeldurchmesser 1 mm und kleiner): 84% im Violettschwingelrasen ($1122.4 \pm 172.2 \text{ g m}^{-2}$) und 81% im Borstlingsrasen ($1161.6 \pm 185.6 \text{ g m}^{-2}$). Rhizome und Grobwurzeln bildeten mit $213.5 \pm 136.7 \text{ g m}^{-2}$ im Violettschwingelrasen und mit $269.5 \pm 61.3 \text{ g m}^{-2}$ im Borstlingsrasen einen deutlich kleineren Anteil an der Gesamtwurzelmasse aus.

Sowohl im Violettschwingel- wie auch im Borstlingsrasen nahm die Gesamtwurzelmasse vom oberen Bodenhorizont (0-5 cm) zum tieferen Horizont (5-10 cm) signifikant ab. In der oberen Bodenschicht betrug die Gesamtwurzelmasse im Violettschwingelrasen $986.8 \pm 250.8 \text{ g m}^{-2}$ (rund 74% der Gesamtwurzelmasse) und im Borstlingsrasen $1095.23 \pm 156.2 \text{ g m}^{-2}$ (76.5% der Wurzelmasse).

Stickstoffbedingte Veränderungen in der Wurzelmasse

Violettschwingelrasen

Unter N-Gabe veränderte sich weder die Feinwurzel- noch die Rhizom/Grobwurzelmasse in den beiden Bodenhorizonten statistisch signifikant. Entsprechend wurde auch in der Gesamtwurzelmasse keine N-bedingte Veränderungen festgestellt (Abb. 2). Auch zwischen den beiden Bodenhorizonten, die sich stark in der Wurzelmasse unterscheiden, wurden keine Interaktion mit der N-Gabe beobachtet.

Borstlingsrasen

Die Gesamtwurzelmasse im Borstlingrasen nahm mit zunehmender N-Gabe zu ($P=0.011$). Bei Unterscheidung in Feinwurzelmasse- und Masse der Rhizom/Grobwurzeln nahm auch die Feinwurzelmasse ($P=0.031$) leicht zu (Abb. 2). Interessanterweise wurde bei den Rhizom/Grobwurzeln eine signifikante Interaktion zwischen der N-Gaben und den Bodenhorizonten festgestellt (Interaktion N-Gabe x Bodentiefe $P=0.026$). Die Masse an Rhizom/Grobwurzeln nahm im oberen Bodenhorizont eher zu, während sie im tieferen Bodenhorizont abnahm. Inwieweit diese Beobachtung mit dem Trend, dass gewisse Krautarten unter erhöhter N-Gabe eher eine Biomasseabnahme aufweisen, erklärt werden kann, muss in den zukünftigen Auswertungen berücksichtigt werden.

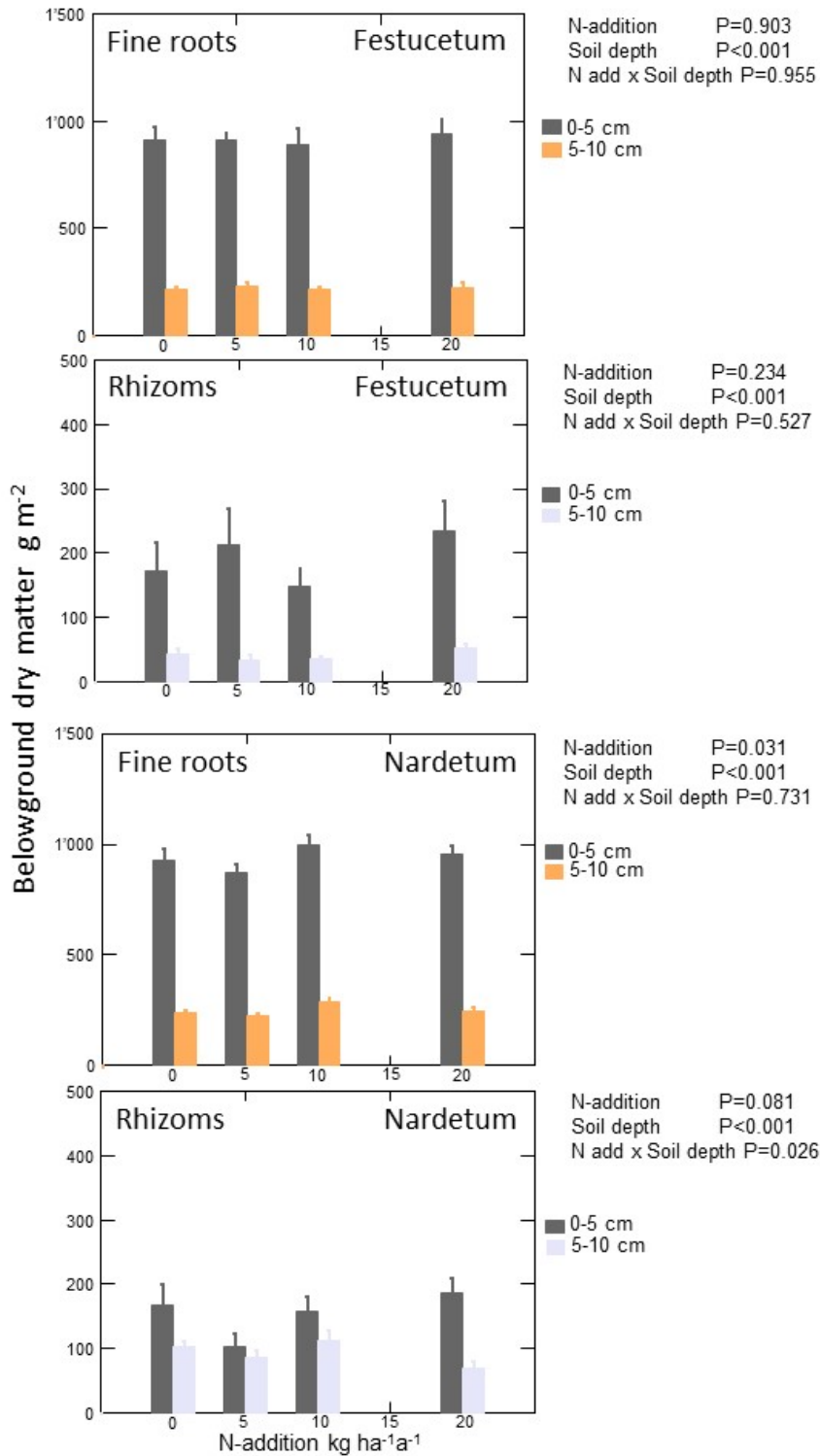
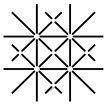
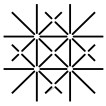


Abb. 2 Feinwurzelmasse und Rhizom/Grobwurzelmasse (in g m⁻²) in 0-5 cm und 5-10 cm Bodentiefe in den alpinen Vegetationstypen Festucetum und Nardetum (Mittelwerte ± se)



Zusätzliche Biomasseproben von Einzelarten

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen die Auswertung der Tillergewichte der Graminoiden im Violettschwingelrasen und im Borstlingsrasen vor. Bei den einzelnen Krautarten (Tabelle 1) wurden die Blattdicken und Blattflächen gemessen und digitalisiert. Das Trockengewicht der einzelnen Krautarten ist noch in Bearbeitung.

Tillergewichte Violettschwingelrasen

Die Tillergewichte der einzelnen Graminoidenarten (jeweils 5 Tiller pro Art) unterscheiden sich erwartungsgemäss stark untereinander. Mit zunehmender N-Gabe nahm das Tillergewicht bei *Anthoxanthum alpinum* ($P < 0.0$) und *Carex sempervirens* ($P < 0.01$) signifikant zu. Die Tillergewichte bei *Helictotrichon versicolor* und auch bei den beiden *Festuca* Arten, *F. violacea* und *F. nigrescens* wiesen keine N-bedingten Veränderungen im Tillergewicht auf.

Tillergewichte Borstlingsrasen

Auch in diesem Vegetationstyp nahm das Tillergewicht bei *Anthoxanthum alpinum* ($P = 0.001$), und *Helictotrichon versicolor* ($P = 0.035$) unter N-Gabe zu. Bei der Segge *Carex curvula* wurden die Tiller unter N-Gabe tendenziell schwerer ($P = 0.069$). Die Tiller des Borstlingsgras *Nardus stricta* wiesen keine N-bedingten Gewichtsveränderungen auf.

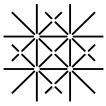
Obwohl noch nicht in allen drei Vegetationstypen vorliegend, wird das Tillergewicht als sehr geeignete Grösse betrachtet um durch N-Gaben verursachte Veränderungen bei Graminoiden festzustellen. Unter erhöhter N-Gabe kann eine Graminoidenart längere Blätter ausbilden (feststellbar als Zunahme in der Blattlänge und im Tillergewicht), mehr Blätter pro Tiller (ebenfalls Zunahme im Tillergewicht) oder mehr Tiller pro Individuum (messbar in der Biomassezunahme). In der weiteren Auswertung sollen diese Unterschiede stärker betont werden.

Blattlängen 2016, 2018 (und 2019 im Krummseggenrasen)

Die Messungen der Blattlängen sind soweit ausgewertet. Interessanterweise reagierten einzelne Arten (wie die Grasart *Anthoxanthum alpinum*), welche in allen drei Pflanzengemeinschaften vorkamen, unterschiedlich auf die N-Gaben in den verschiedenen Pflanzengemeinschaften. Deutlich längere *Anthoxanthum* Blätter wurden im Violettschwingel- ($P < 0.001$) und weniger stark ausgeprägt im Borstlingsrasen ($P = 0.08$) Krummseggenrasen ($P = 0.10$) bei zunehmender N-Gabe beobachtet. Auch bei Pflanzenarten, die in zwei Pflanzengemeinschaften auftraten (2 Graminoide: *Carex curvula*, *Helictotrichon versicolor*; 2 Krautarten *Leontodon helveticus*, *Potentilla aurea*), unterschied sich teilweise ihre Empfindlichkeit gegenüber N-Gaben in den zwei Pflanzengemeinschaften. Hier beeinflussen die unterschiedlichen Lebensbedingungen (abiotisch [Temperatur, Trockenheit], biotisch [Konkurrenz]) in den drei Pflanzengemeinschaften die Empfindlichkeit gegenüber N-Gaben.

Weitere erklärende Messgrössen in den drei Pflanzengemeinschaften

Zur detaillierteren Erfassung der Lebensbedingungen wurden in den drei alpinen Pflanzengemeinschaften Regenwippen, Bodenfeuchtesensoren und Sensoren für Bodentemperaturen installiert. Ziel ist es, bei der Analyse der Vegetationsveränderungen, einflussreiche Umweltparameter als gemessene Grössen mitberücksichtigen zu können (Verbesserung der statistischen Modelle).



Ausblick

Die Ergebnisse aus dem Versuch über die «Wirkung atmosphärischer Stickstoffdeposition auf drei alpine Vegetationstypen» werden in Form von wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Abgrenzung der jeweiligen Themenpakete der Publikationen noch offen.

Ein Fokus wird auf die unterschiedlichen Sensitivität von gleichen Arten mit Vorkommen in unterschiedlichen Pflanzengemeinschaften gegenüber N-Gaben gelegt werden. Ein weiterer Schwerpunkt wird die Reaktionen der unterirdischen Biomasse der alpinen Pflanzengemeinschaften auf die N-Gaben darstellen. Beide Aspekte wurden in der Literatur bisher nicht berücksichtigt.

Referenzen

- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erismann JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W (2010) Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecol Appl* 20:30-59
- Dise NC, Ashmore M, Belyazid S, Bleeker A, Bobbink R, de Vries W, Erismann JW, Spranger T, Stevens CJ, van den Berg L (2011) Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity *In*: Mark A. Sutton et al. (eds.) *The European Nitrogen Assessment*, Published by Cambridge University Press
- Hettelingh J-P, Tomassen H, Bobbink R (2011) Executive Summary in Bobbink R & Hettelingh JP (eds.) (2011) Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships: Proceedings of an expert workshop, 23-25 June 2010. Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Noordwijkerhout
- Körner C, Hiltbrunner E (2018) The 90 ways to describe plant temperature. *PPEES* 30:16-21
- Niinemets Ü, Kull K (2005) Co-limitation of plant primary productivity by nitrogen and phosphorus in a species-rich wooded meadow on calcareous soils. *Acta Oecol* 28:345-356
- Phoenix GK, Hicks WK, Cinderby S, Kuylensstierna JCI, Stock WD, Dentener FJ, Giller KE, Austin AT, Lefroy RDB, Gimeno BS, Ashmore MR, Ineson P (2006) Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Glob Change Biol* 12:470-476
- Roth T, Kohli L, Rihm B, Achermann B. (2013) Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 178:121–126
- Sala OE, Chapin III FS, Armesto JJ, et al. (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287:1770-1774
- Southon GE, Field C, Caporn SJM, Britton AJ, Power SA (2013) Nitrogen deposition reduces plant diversity and alters ecosystem functioning: field-scale evidence from a nationwide survey of UK heathlands. *PLOSone* 8:e59031

Basel, den 30. November 2020

Erika Hiltbrunner

Anhang Tabelle 1: Witterungsbedingungen Furka (Wetterstation 2440 m a.s.l.) während der Jahre 2013-2020 (blau: nasser bzw. kälter als normal; rot: trockener bzw. wärmer als normal)

Year	Precipitation mm	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual	Jun - Aug
2013		22.8	31.7	14.1	142.7	215.0	104.5	138.7	135.7	131.0	108.1	74.3	58.0	1177	379
2014		54.6	61.4	59.2	84.0	123.3	107.4	215.3	171.1	83.9	98.9	174.5	46.7	1280	494
2015		95.0	34.1	68.6	34.3	157.8	135.7	63.8	185.2	155.2	91.2	55.9	8.3	1085	385
2016		69.2	73.6	28.1	88.1	130.3	160.8	131.9	80.6	114.7	78.4	57.7	4.9	1018	373
2017		44.6	34.9	112.5	77.7	67.3	157.0	142.7	177.4	134.4	74.4	57.1	95.7	1176	477
2018		157.9	19.5	122.5	84.5	99.9	59.2	69.1	114.7	68.9	119.7	50.5	94.8	1061	243
2019		31.3	16.5	44.9	141.8	51.8	218.0	78.8	152.0	85.8	235.6	116.6	70.8	1244	449
2020		13.3	85.2	48	20.3	78.9	165.4	88.1	171.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	425
Year	Air temperature °C	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	MAT	Jun - Aug
2013	Mean of daily mean	-9.0	-11.6	-6.9	-1.4	-1.1	4.2	9.1	8.0	5.2	2.3	-5.0	-3.2	-0.8	7.1
2014	Mean	-5.3	-7.1	-2.8	-0.8	0.0	5.9	6.6	5.5	5.1	3.4	-0.2	-5.6	0.4	6.0
2015	Mean	-6.8	-7.7	-4.2	-1.6	2.0	6.3	11.0	9.2	n.a.#	0.7	-0.3	-0.1	0.8	8.8
2016	Mean	-6.4	-6.5	-6.6	-2.4	0.1	4.8	8.4	8.5	6.3	-0.2	-3.5	-1.9	0.1	7.2
2017	Mean	-8.9	-4.9	-2.0	-2.9	2.4	8.3	8.2	9.4	2.0	2.9	-4.4	-7.8	0.2	8.6
2018	Mean	-5.2	-11.4	-7.2	0.2	3.1	6.2	9.1	9.1	6.8	2.9	-2.4	-5.2	0.5	8.1
2019	Mean	-10.3	n.a.#	-4.7	-3.0	-1.6	8.5	9.3	9.2	5.7	3.1	-4.4	-3.7	0.5	9.0
2020	Mean	-3.6	-4.3	-4.8	0.9	2.8	5.3	9.2	9.0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.8
2013	Abs. Minimum	-19.7	-21.4	-19.8	-11.1	-9.6	-4.0	2.3	0.8	-6.1	-8.7	-18.8	-13.3		
2014	Abs. Minimum	-15.5	-12.4	-14.6	-10.4	-8.3	-1.9	-1.6	-1.6	-3.9	-9.4	-7.9	-18.3		
2015	Abs. Minimum	-15.9	-16.5	-14.9	-16.0	-6.8	-1.9	0.3	0.0	n.a.#	-7.9	-17.5	-9.2		
2016	Abs. Minimum	-20.5	-15.1	-16.4	-13.0	-7.8	-1.9	-3.5	-3.0	-0.3	-10.2	-13.4	-11.4		
2017	Abs. Minimum	-21.4	-13.8	-13.0	-15.7	-9.5	-2.8	-0.4	-1.3	-5.3	-7.6	-14.8	-18.3		
2018	Abs. Minimum	-13.8	-28.3	-19.3	-10.9	-3.5	-2.3	2.8	-3.1	-4.7	-6.6	-11.5	-15.8		
2019	Abs. Minimum	-19.4	n.a.#	-14.9	-12.2	-11.8	-1.2	1.3	0.0	-3.1	-6.9	-6.3	-6.4		
2020	Abs. Minimum	-16.2	-14.4	-14.9	-8.7	-5.1	-1.7	-0.4	-1.6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
2013	Abs. Maximum	2.9	0.9	6.2	11.4	7.5	15.8	16.4	19.4	15.6	11.0	5.2	8.2		
2014	Abs. Maximum	3.9	2.1	9.6	10.5	7.1	18.0	16.0	12.4	12.6	12.5	9.6	4.1		
2015	Abs. Maximum	5.0	6.4	5.5	7.4	11.7	15.4	19.8	18.2	n.a.#	11.2	12.4	8.4		
2016	Abs. Maximum	9.0	5.9	6.8	9.1	12.2	18.4	17.4	18.3	14.7	11.0	7.6	6.1		
2017	Abs. Maximum	2.6	3.5	8.2	9.2	15.3	18.8	16.2	17.8	11.8	13.8	6.7	5.6		
2018	Abs. Maximum	4.2	-0.1	1.0	8.7	11.8	14.9	17.7	17.6	16.2	10.5	6.6	4.5		
2019	Abs. Maximum	4.3	n.a.#	7.3	5.8	11.5	20.4	19.4	15.9	15.1	11.3	-2.4	-1.3		
2020	Abs. Maximum	6.4	5.7	7.4	7.3	12.4	15.1	19.0	17.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		

Temp. sensor broken