

Bericht Nr.: FWE22_04

**Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima –
Ergänzende Untersuchungen für die Stadtregion
Zürich unter Berücksichtigung von
Feuchteparametern**

Auftrag: Ergänzung der Feuchteparameter in den
Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima
der Stadtregion Zürich und Erstellung von
Summenhäufigkeitsdiagrammen

Auftraggeber: Stadt Zürich
Amt für Hochbauten (AHB)
Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Datum: 20. Februar 2023

Dieser Bericht umfasst 71 Seiten und darf ohne die schriftliche Genehmigung von
FREI WÜEST EXPERT nur in ungekürzter Form vervielfältigt werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung.....	3
2.	Auftraggeber.....	3
3.	Auftrag.....	4
4.	Vorgehen.....	4
5.	Ergebnisse	6
5.1.	Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima – Projektbericht MeteoSchweiz et. al.....	6
5.2.	Vergleich der Klimaszenarien mit verfügbaren Datensätzen von Meteonorm.....	8
5.3.	Ergänzung der Klimaszenarien für zukünftige Innenraumklima der Stadtregion Zürich.....	10
5.4.	Zusammenstellung von Feuchteparametern aus den ergänzten Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima in der Stadtregion Zürich.....	13
6.	Erkenntnisse und Fazit.....	30
7.	Anhang Summenhäufigkeitsdiagramme aus den Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima der Stadtregion Zürich.....	35

Interne Angaben

Ersteller: Beat Frei

Ablage: FWE22_04_Bericht_V1.1_AHB_Klimaszenarien_zukünftige_Innenraumklima_Zürich_2023-02-20

Datum / Version: 20.02.2023 / Version 1.1

Änderungsverzeichnis

Datum	Visum	Version	Änderung / Kapitel
06.04.2022	Frb	1.0	
20.02.2023	Frb	1.1	Anpassungen der ausgewerteten Stunden für die Taupunkt- und Feuchtkugel-Temperatur aufgrund verfeinerter Auswertemethodik im laufenden BFE-Projekt RePPER, redaktionelle Anpassungen gemäss Schlussbesprechung mit Auftraggeber.

1. Zusammenfassung

Das Projekt «Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima (SIA 2028)» von MeteoSchweiz, dem Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein und der Hochschule Luzern – Technik & Architektur stellt physikalisch konsistente Datensätze für die Raumklimasimulation von heutigen und zukünftigen Gebäuden zur Verfügung.

Beim Studium der Projektberichte wurde festgestellt, dass die aus dem Merkblatt SIA 2028:2010 bekannten Feuchteparameter wie Taupunkttemperatur, Mischungsverhältnis und Feuchtkugeltemperatur nicht in den generierten Klimadatensätzen enthalten sind.

Im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich wurden die Klimadatensätze mit den erwähnten Feuchteparametern ergänzt.

Im vorliegenden Bericht dieser Auftragsarbeit werden die Erkenntnisse aus den erarbeiteten Summenhäufigkeitsdiagrammen zusammengefasst. Für die Feuchteparameter Taupunkttemperatur und Feuchtkugeltemperatur wurden Stundenwerte der Stationen Zürich/Fluntern (SMA) und Zürich/Kaserne in den Klimaszenarien ausgewertet.

Ebenso wurden Befeuchtungs- und Entfeuchtungsgrammstunden für die beiden erwähnten Stationen ausgewertet.

Aus den Ergebnissen dieser Auftragsarbeit folgt, dass für zukünftige Klimaszenarien sowohl Temperaturänderungen als auch Feuchteänderungen massgebend sind. Steigende Aussenlufttemperaturen werden bei vorhandener Feuchte und entsprechender Verdunstung zu erhöhten Taupunkt- und Feuchtkugeltemperaturen führen. Dies muss bei der Komfortbewertung und bei der Bemessung der Be- und Entfeuchtung berücksichtigt werden.

Inskünftig werden sowohl der Klimawandel und als auch sich verändernde Komfortansprüche den Leistungs- und Energiebedarf von gebäudetechnischen Anlagen stark beeinflussen.

2. Auftraggeber

Auftraggeber: Stadt Zürich
 Amt für Hochbauten (AHB)
 Lindenhofstrasse 21
 8021 Zürich

Kontaktperson: Herrn Franz Sprecher
 Leiter Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik

3. Auftrag

Kritische Würdigung der Ergebnisse des Projekts Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima bezüglich Überhitzungsstunden, Kernaussagen und offener Punkte.

Vergleich Klimaszenarien RCP 8.5 2035 / RCP 2.6 2060 / RCP 8.5 2060 mit bereits verfügbaren Datensätzen aus Meteonorm V8.1.1. In den verfügbaren Datensätzen aus Meteonorm sind die Feuchteparameter enthalten.

Exploration zur Ergänzung der Feuchteparameter in den Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima in der Stadt Zürich. Auswirkungen auf die Taupunkttemperatur, Feuchtkugeltemperatur und Schwüle

Erstellung von Summenhäufigkeitsdiagrammen für die nachfolgenden Klimaszenarien (Basis Zürich, Normaljahr SIA 2028)

- o 2035 / RCP 8.5 / DRY
- o 2035 / RCP 8.5 / 1 in 10
- o 2060 / RCP 2.6 / DRY
- o 2060 / RCP 2.6 / 1 in 10
- o 2060 / RCP 8.5 / DRY
- o 2060 / RCP 8.5 / 1 in 10
- o 2035 / RCP 8.5 / DRY / Innenstadt
- o 2035 / RCP 8.5 / 1 in 10 / Innenstadt
- o 2060 / RCP 2.6 / DRY / Innenstadt
- o 2060 / RCP 2.6 / 1 in 10 / Innenstadt
- o 2060 / RCP 8.5 / DRY / Innenstadt
- o 2060 / RCP 8.5 / 1 in 10 / Innenstadt

Zusammenfassung der Ergebnisse und Summenhäufigkeitsdiagramme in einem Kurzbericht.

4. Vorgehen

Damit die Feuchteparameter Taupunkttemperatur, spezifische Enthalpie, Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt) und Feuchtkugeltemperatur berechnet werden können, ist üblicherweise die Angabe des barometrischen Drucks in den Stundenwerten der Klimadatensätze erforderlich. Hierzu wurde zuerst untersucht, wie empfindlich die Feuchteparameter auf den barometrischen Druck sind.

Es wurde erkannt, dass der barometrische Druck für die Berechnung von Feuchteparametern als konstant betrachtet werden kann. Aus der Stationshöhe konnte der barometrische Druck berechnet werden. Mittels einer kleinen Literaturrecherche konnten für die Feuchteparameter Taupunkttemperatur und Feuchtkugeltemperatur Approximationsformeln gefunden werden.

Die spezifische Enthalpie und das Mischungsverhältnis konnten aus allgemein bekannten Zusammenhängen berechnet werden.

Die Klimadatensätze der Stationen Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern (SMA), Zürich/Kaserne und Zürich-Kloten wurden danach mit den Feuchteparametern ergänzt.

Exemplarisch wurden die ergänzten Klimadatensätze fürs zukünftige Innenraumklima auch mit Klimadatensätzen verglichen, die aus dem weitverbreiteten Softwareprogramm Meteonorm stammen.

Für die Darstellung der Summenhäufigkeitskurven wurde das aus dem Merkblatt SIA 2028:2010 bekannte Summenhäufigkeitsdiagramm gewählt. Es wird dort zwischen Tag (07 bis 19 Uhr) und Nacht (19 bis 07 Uhr) unterschieden.

Die Summenhäufigkeitsdiagramme wurden für die Klimaszenarien 2035 RCP 8.5, 2060 RCP 2.6 und 2060 RCP 8.5 in den Varianten Design Reference Year (DRY) und 1in10-warmsummer für die erwähnten Stationen der Stadtregion Zürich erstellt.

5. Ergebnisse

5.1. Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima – Projektbericht MeteoSchweiz, SIA und HSLU

Im Projekt «Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima (SIA 2028)» wurden konsistente stündliche Datensätze für die Raumklimasimulationen entwickelt. Damit sollen Planer robuste Gebäude für zukünftige Klimata auslegen, damit weiterhin behagliche Raumklima mit vernünftigem Energieaufwand geschaffen werden können.

Dateitypen	Zeiträume	Emissions-szenario	Stationen Umland	Zusätzliche Stationen Innen-stadt
DRY	2020 – 2049 («2035»)	RCP8.5	40 Stationen gemäss SIA 2028 plus Zürich / Affoltern	Basel, Bern, Lausanne, Zürich
	2045 – 2074 («2060»)	RCP2.6		
		RCP8.5		
1 in 10	2020 – 2049 («2035»)	RCP8.5		
	2045 – 2074 («2060»)	RCP2.6		
		RCP8.5		

Quelle: SIA-Anwendungsempfehlung zu den stündlichen Klimadaten für die Zukunft in Ergänzung zu SIA 2028.

Folgende Parameter sind in den Klimaszenarien enthalten:

Parametername	Bedeutung	Einheit	Zeitliche Auflösung
tre200h0	Lufttemperatur 2 m über Boden	°C	Stundenmittel
ure200h0	Relative Luftfeuchte	%	Stundenmittel
fkI010h0	Windgeschwindigkeit, Mittel	m s ⁻¹	Stundenmittel
fkI010h1	Windgeschwindigkeit, Böenspitze	m s ⁻¹	Momentanwert, Sekundenböe
dkI010h0	Windrichtung	Grad	Stundenmittel
skycover	Bewölkung	%	Momentanwerte, linear interpoliert
gls	Globalstrahlung horizontal	W m ⁻²	Stundenmittel
str.diffus	Diffuse Strahlung horizontal	W m ⁻²	Stundenmittel
str.direkt	Direktstrahlung normal (Beam)	W m ⁻²	Stundenmittel

Quelle: SIA-Anwendungsempfehlung zu den stündlichen Klimadaten für die Zukunft in Ergänzung zu SIA 2028.

In dieser Zusammenstellung fehlen wichtige Feuchteparameter, die in den üblichen Klimadaten nach SIA 2028:2010 enthalten sind. Es sind dies:

Taupunkttemperatur
Spezifische Enthalpie
Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt)
Feuchtkugeltemperatur

Im Bericht zu den *Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima* werden im Kapitel 7 Gebäudesimulation die Stationen Zürich-Kloten, Davos und Lugano untersucht. In der Studie *ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels: Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100* der Hochschule Luzern wurden 2017 die beiden Stationen Basel und Lugano untersucht.

5.2. Vergleich der Klimaszenarien mit verfügbaren Datensätzen von Meteonorm

Im weitverbreiteten Softwareprogramm *Meteonorm* werden in der aktuellen Version 8.1.1 ebenfalls Klimadaten für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 zur Verfügung gestellt (2030 bis 2100, in Zehnjahresschritten). Im Ausgabeformat SIA 2028 sind die erwünschten Feuchteparameter, wie aus der SIA 2028:2010 gewohnt, enthalten.

Nachteilig ist, dass in *Meteonorm* die Klimaszenarien nicht für 2035 berechnet werden können. Der Anwender muss sich zwischen 2030 und 2040 entscheiden. Zudem sind die Klimadaten für Zürich/Kaserne und Zürich-Affoltern (noch) nicht verfügbar. Nachfolgend werden in *Abbildung 1* und *Abbildung 2* Vergleiche für die Taupunkttemperatur in den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 im Jahr 2060 gezeigt.

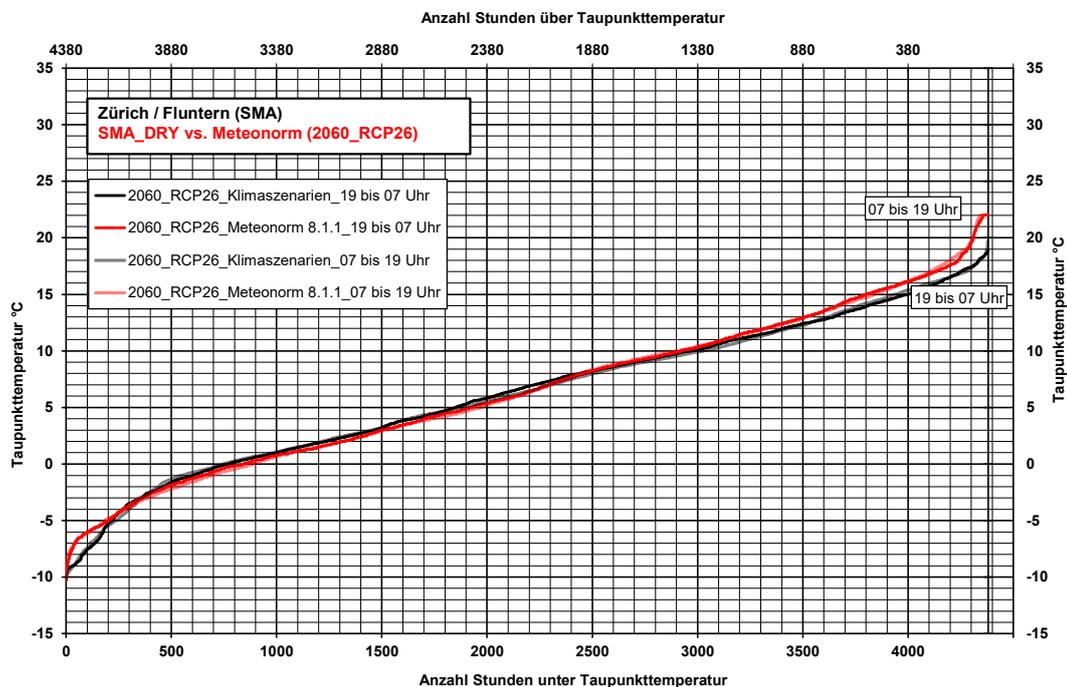


Abbildung 1: Summenhäufigkeit der Taupunkttemperatur für RCP 2.6_2060 im Klimaszenario und aus dem Programm *Meteonorm* 8.1.1.

Auffällig ist, dass *Meteonorm* für das Klimaszenario 2060 RCP 2.6 in Taupunkttemperatur-Bereichen unter -5°C und über $+11^{\circ}\text{C}$ höhere Summenhäufigkeiten sowohl am Tag als auch in der Nacht ausweist.

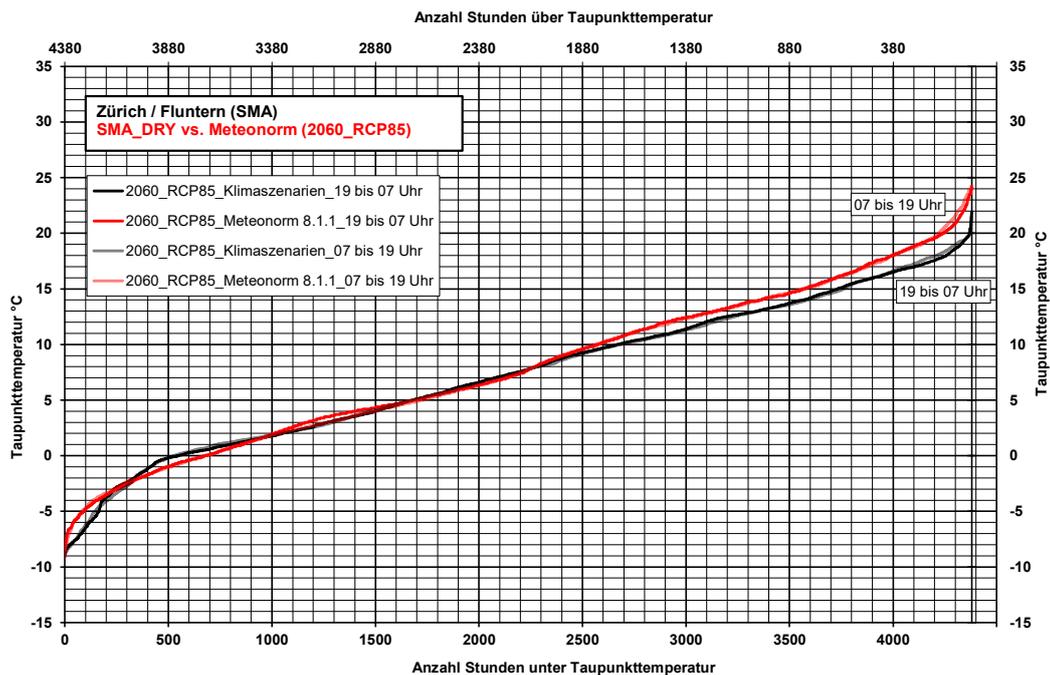


Abbildung 2: Summenhäufigkeit der Taupunkttemperatur für RCP 8.5_2060 im Klimaszenario und aus dem Programm Meteonorm 8.1.1.

Wie bereits im Klimaszenario 2060 RCP 2.6 werden auch im Klimaszenario 2060 RCP 8.5 unterschiedliche Summenhäufigkeiten ausgewiesen. Oberhalb von etwa 10°C Taupunkttemperatur sind die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsarten in den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 deutlich sichtbar.

Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit in *Meteonorm* und der ausgeprägten Unterschiede zu den Datensätzen aus den *Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima* wurde entschieden, diesen Ansatz nicht mehr weiter zu verfolgen.

Daher wurden für die weiteren Berechnungen die Datensätze aus den *Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima* mit den Feuchteparametern ergänzt.

5.3. Ergänzung der Klimaszenarien für zukünftige Innenraumklima der Stadtregion Zürich

Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit und der beobachteten Unterschiede bezüglich Taupunkttemperatur wurde entschieden, dass die Datensätze aus den *Klimaszenarien für zukünftige Innenraumklima* mit Feuchteparametern zu ergänzen sind. Hierzu wurde in einem ersten Schritt die Sensitivität des barometrischen Drucks auf die Feuchteparameter untersucht.

Mit dem Berechnungsprogramm *HumiCalc with Uncertainty* von *Thunder Scientific* wurden für zwei Aussenluftzustände bei minimalem und maximalem barometrischem Druck (gemäss Station Zürich_SMA_sia_normal-hour) die Feuchteparameter Taupunkttemperatur, spezifische Enthalpie, Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt) und Feuchtkugeltemperatur untersucht.

Aussenluftzustand 1

Minimal-/Maximalwert für den barometrischen Druck auf Stationshöhe (556 m ü.M.): 92400 Pa resp. 96900 Pa.

Aussenlufttemperatur: 3.5°C

Aussenluftfeuchte: 90%

Parameter	Value (92400 Pa)	Value (96900 Pa)
%RH	90.0 ±0.000	90.0 ±0.000
Temperature	3.5 ±0.000	3.5 ±0.000
Pressure	92400.0 ±0.000	96900.0 ±0.000
Dew Point	2.016815545 ±0.002	2.016787047 ±0.002
Enthalpy	15.58459798 ±0.0012	15.02183204 ±0.0012
Wet Bulb Temperature	2.818577116 ±0.0006	2.83580137 ±0.0006
Mixing Ratio by Volume	0.0077361 ±8E-007	0.00773516 ±7E-007
Mixing Ratio by Weight	0.004812944 ±5E-007	0.004588486 ±5E-007

Abbildung 3: Berechnungsergebnisse für den Aussenluftzustand 1.

Die Sensitivität liegt bei allen Feuchteparametern unter 5 %.

Aussenluftzustand 2

Maximal-/Maximalwert für den barometrischen Druck auf Stationshöhe (556 m. ü. M.): 92400 Pa resp. 96900 Pa.

Aussenlufttemperatur: 26°C

Aussenluftfeuchte: 62%

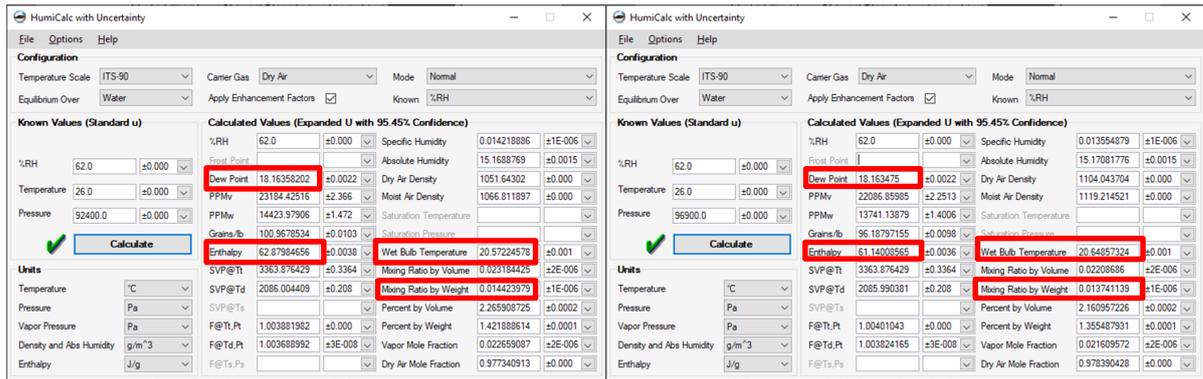


Abbildung 4: Berechnungsergebnisse für den Aussenluftzustand 2.

Die Sensitivität liegt bei allen Feuchteparametern unter 5 %.

Aufgrund der niedrigen Sensitivität wurden für die vier Stationen der Stadtregion Zürich folgende barometrische Drücke auf Basis der Stationshöhe berechnet und festgelegt:

Zürich-Affoltern	REH	444 m ü. M.	95848 Pa
Zürich/Fluntern	SMA	556 m ü. M.	94514 Pa
Zürich/Kaserne	NABZUE	409 m ü. M.	96269 Pa
Zürich-Kloten	KLO	426 m ü. M.	96064 Pa

Folgende Berechnungsformeln wurden für die Feuchteparameter verwendet:

Taupunkttemperatur (Formel nach Magnus-Tetjens)

$$T_s = (b \times \alpha(T, RH)) / (a - \alpha(T, RH))$$

$$\alpha(T, RH) = \ln(RH/100) + aT/(b+T)$$

worin:

T_s Taupunkttemperatur [°C]

T Trockenkugeltemperatur [°C]

RH Relative Feuchte [%]

a, b Magnus-Koeffizienten, gemäss Alduchov und Eskridge betragen diese

$$a=17.625$$

$$b=243.04$$

Im Bereich von -45°C bis 60°C beträgt die Unsicherheit der Taupunkttemperatur maximal 0.35 K.

Feuchtkugeltemperatur (Formel nach Stull)

$$T_w = T \times \arctan[0.151977 \times (RH + 8.313659)^{(1/2)}] + \arctan(T + RH) - \arctan(RH - 1.676331) + 0.00391838 \times (RH)^{(3/2)} \times \arctan(0.023101 \times RH) - 4.686035$$

worin:

T_w Feuchtkugeltemperatur [°C]
 T Trockenkugeltemperatur [°C]
RH Relative Feuchte [%]

Im Bereich von 5% bis 99% relativer Feuchte und von -20°C bis 50°C beträgt die Unsicherheit der Feuchtkugeltemperatur -1°C bis +0.65°C.

Spezifische Enthalpie (Formel nach Bernd Glück)

$$h = 1.01 \times T + x \times (2501 + 1.86 \times T)$$

worin

h spezifische Enthalpie [kJ/kg]
 T Trockenkugeltemperatur [°C]
 x Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt) [kg/kg]

Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt)

$$e = 6.11 \times 10^{(7.5 \times T_s / (237.7 + T_s))}$$

$$w = 621.97 \times e / (p_B - e)$$

eingesetzt

$$w = 621.97 \times 6.11 \times 10^{(7.5 \times T_s / (237.7 + T_s))} / (p_B - 6.11 \times 10^{(7.5 \times T_s / (237.7 + T_s))})$$

worin

e Wasserdampfdruck [hPa]
 T_s Taupunkttemperatur [°C]

5.4. Zusammenstellung von Feuchteparametern aus den ergänzten Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima in der Stadtregion Zürich

Für die nachfolgenden Stationen der Stadtregion Zürich wurden die Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima mit Feuchteparametern ergänzt:

Zürich-Affoltern	REH
Zürich/Fluntern	SMA
Zürich/Kaserne	NABZUE
Zürich-Kloten	KLO

Bearbeitet wurden die nachfolgenden Klimaszenarien:

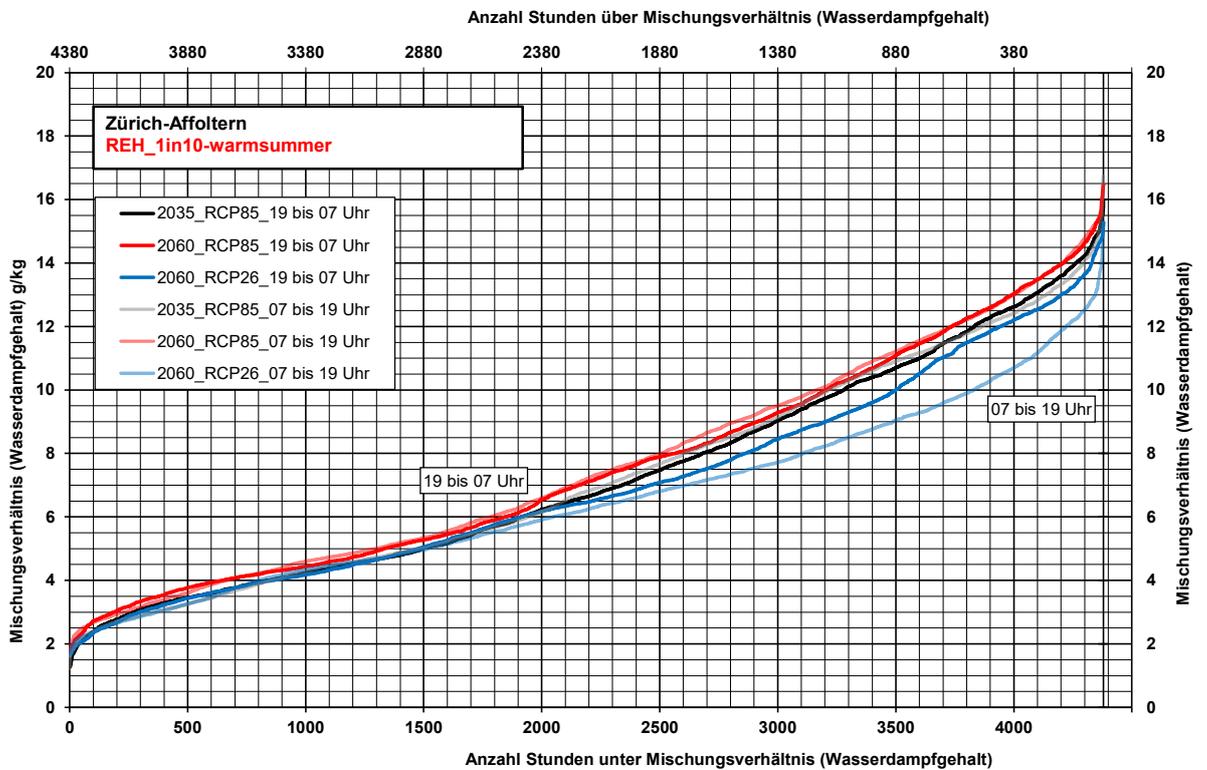
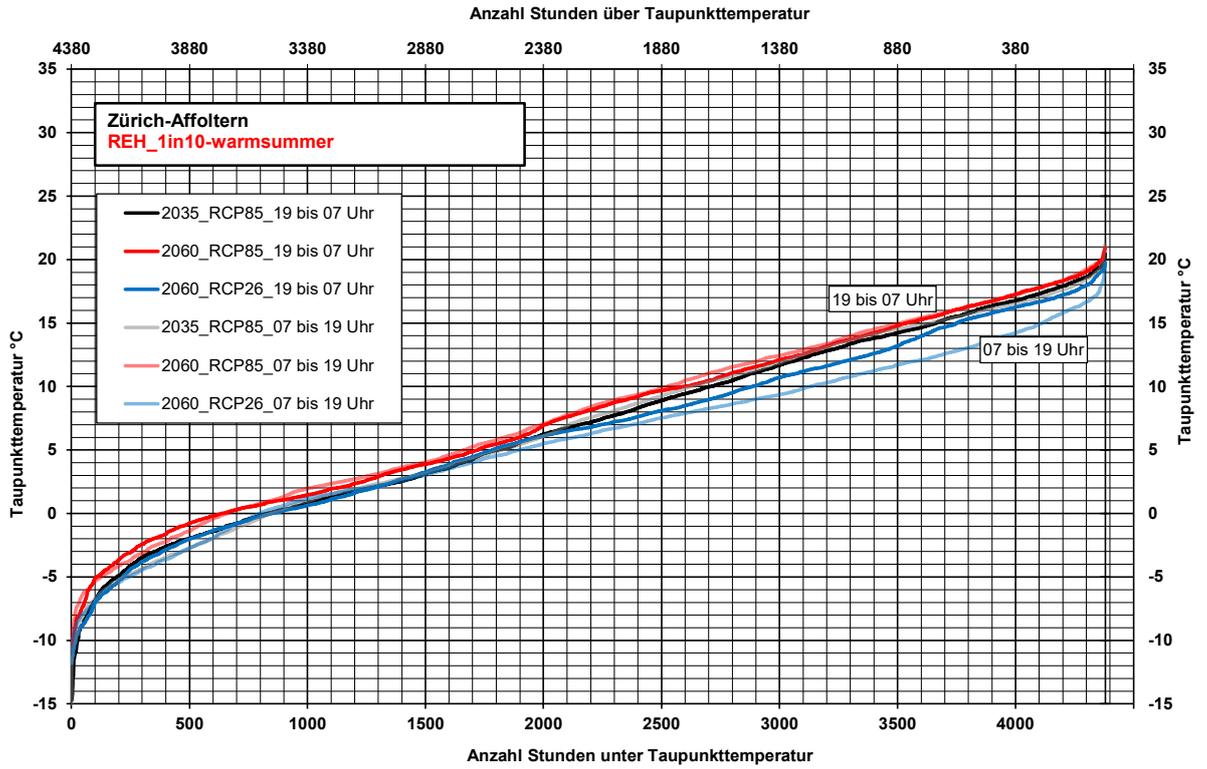
- o 2035 / RCP 8.5 / DRY [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2035 / RCP 8.5 / 1 in 10 warmsummer/ [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2060 / RCP 2.6 / DRY/ [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2060 / RCP 2.6 / 1 in 10 warmsummer/ [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2060 / RCP 8.5 / DRY/ [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2060 / RCP 8.5 1 in 10 warmsummer / [Zürich-Affoltern, Zürich/Fluntern, Zürich-Kloten]
- o 2035 / RCP 8.5 / DRY / [Zürich/Kaserne]
- o 2035 / RCP 8.5 / 1 in 10 warmsummer / [Zürich/Kaserne]
- o 2060 / RCP 2.6 / DRY / [Zürich/Kaserne]
- o 2060 / RCP 2.6 / 1 in 10 warmsummer / [Zürich/Kaserne]
- o 2060 / RCP 8.5 / DRY / [Zürich/Kaserne]
- o 2060 / RCP 8.5 / 1 in 10 warmsummer / [Zürich/Kaserne]

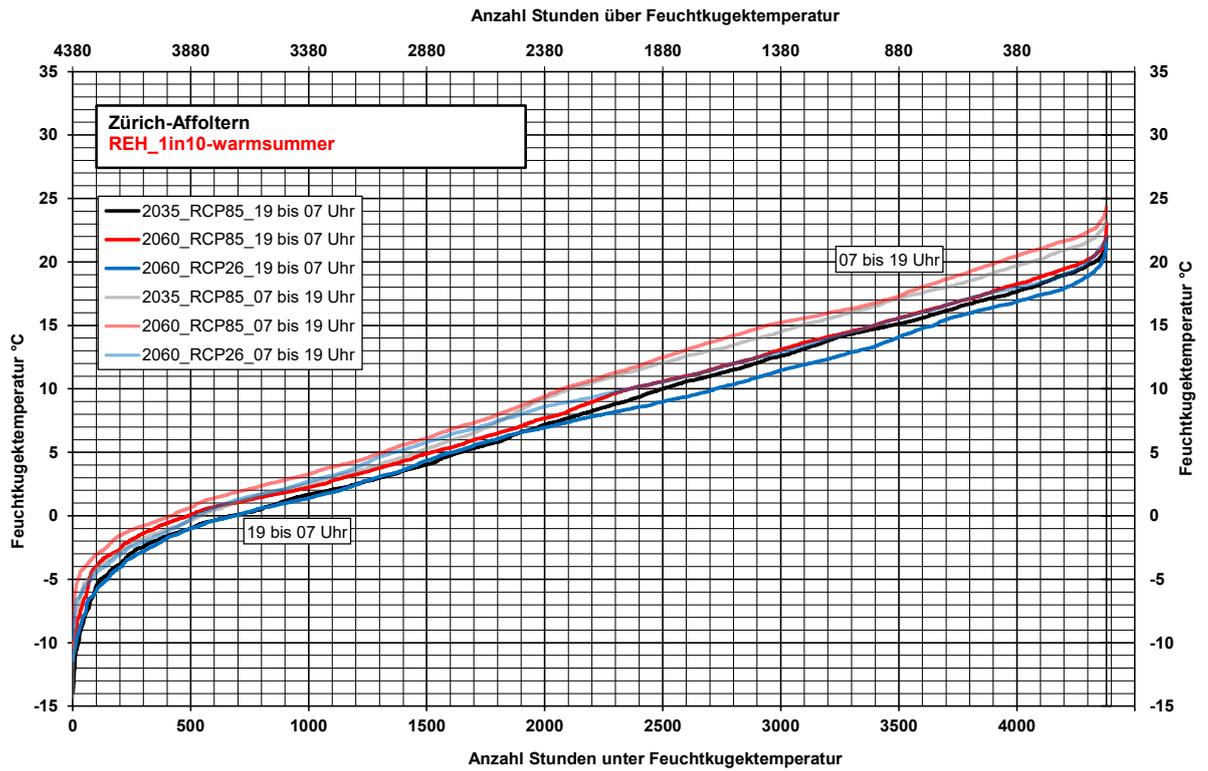
Sämtliche EXCEL-Datenfiles wurden dem Auftraggeber in elektronischer Form zur Verfügung gestellt.

Im Anhang sind die Summenhäufigkeitsdiagramme der Station Zürich/Kaserne (NABZUE) aufgeführt.

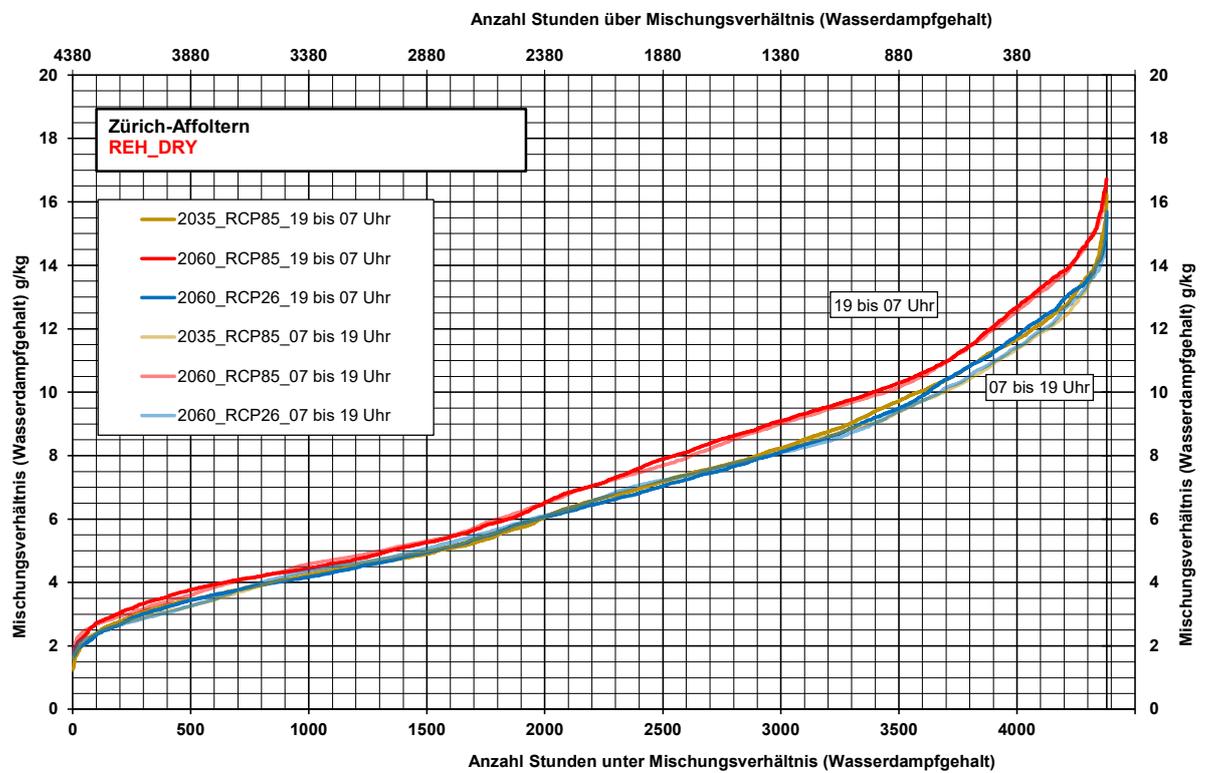
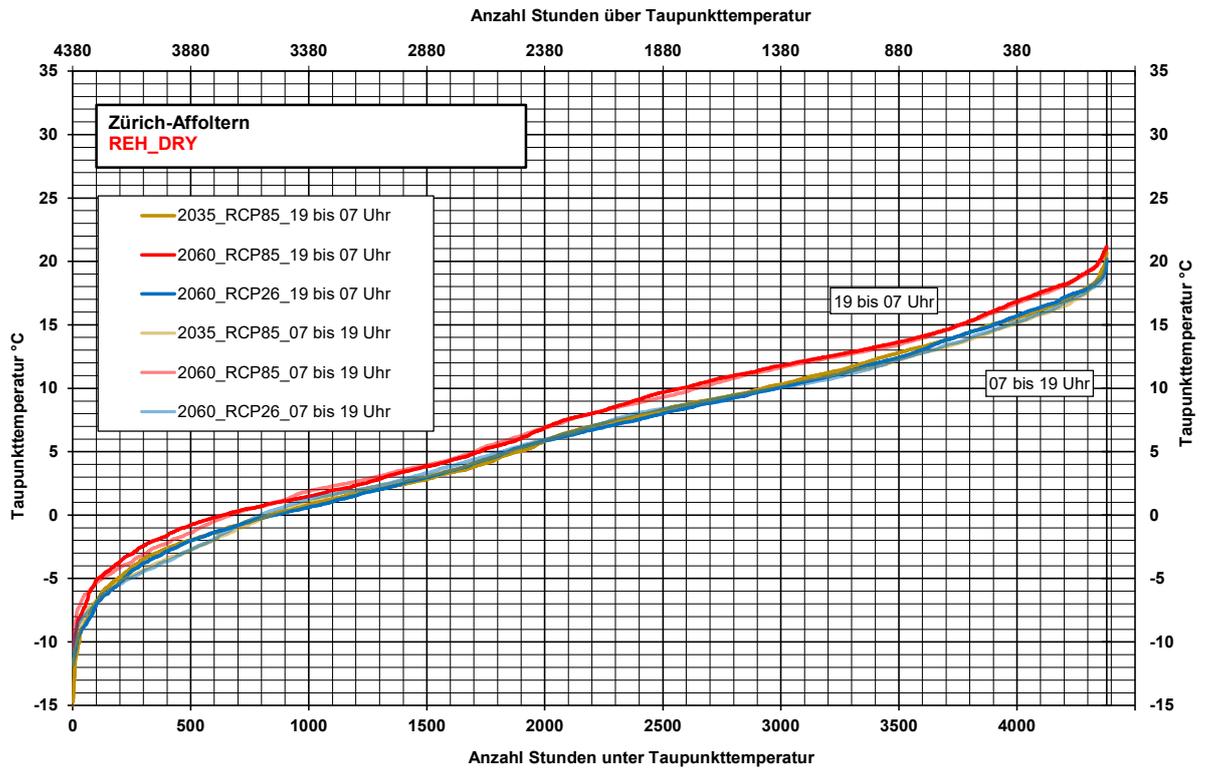
In diesem Kurzbericht werden für die Feuchteparameter Taupunkttemperatur, Mischungsverhältnis (Wasserdampfgehalt) und Feuchtkugeltemperatur Übersichtsdiagramme zu den Klimaszenarien bereitgestellt.

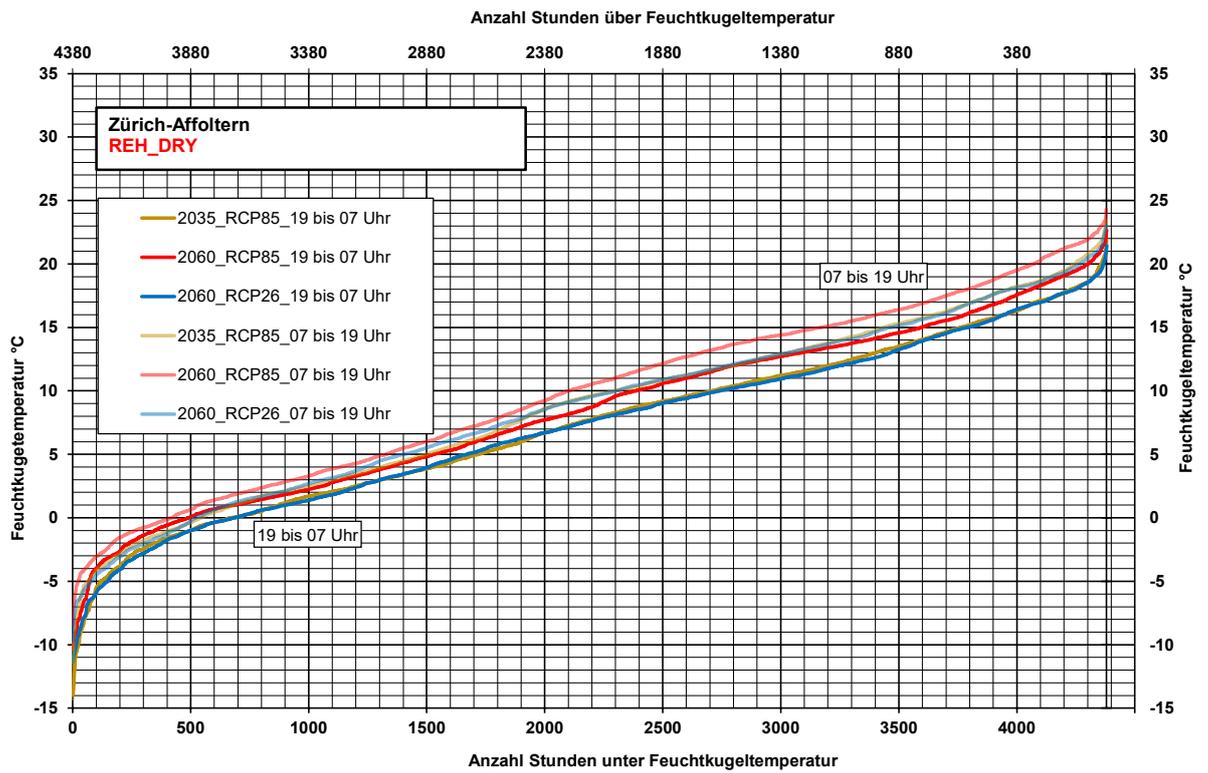
Station Zürich-Affoltern [1in10-warmsummer]



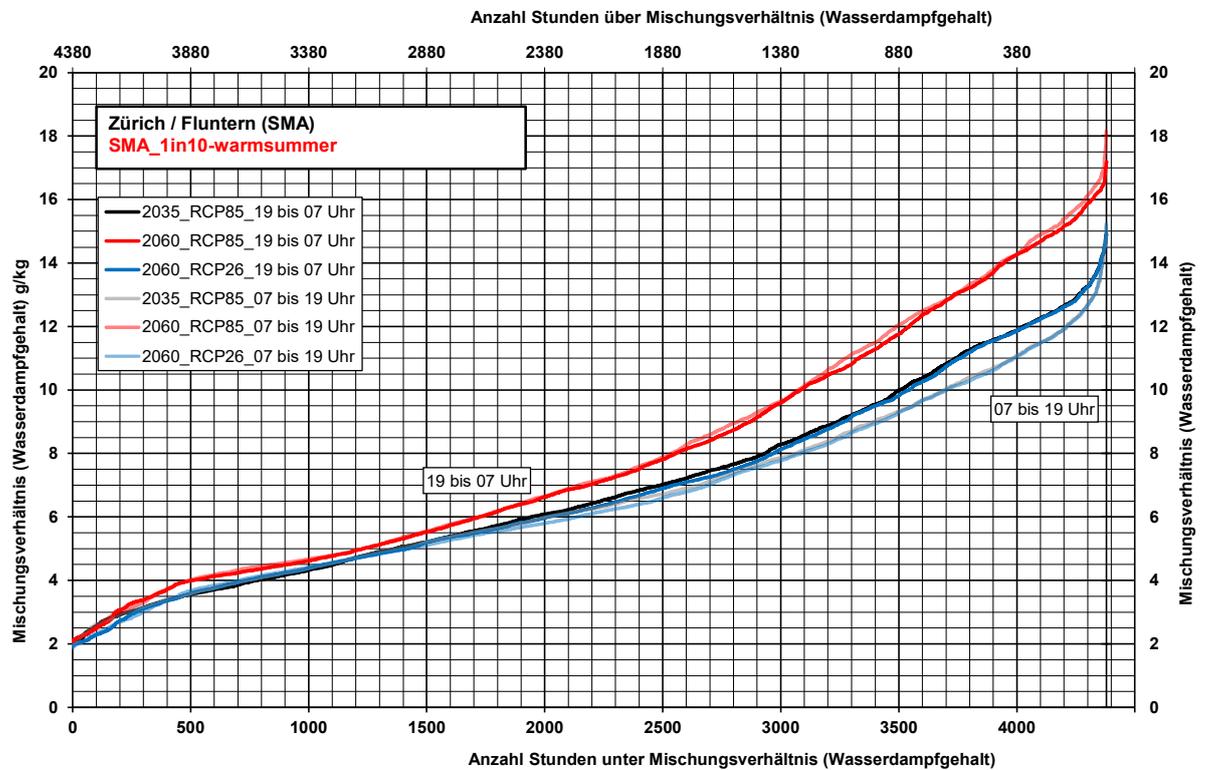
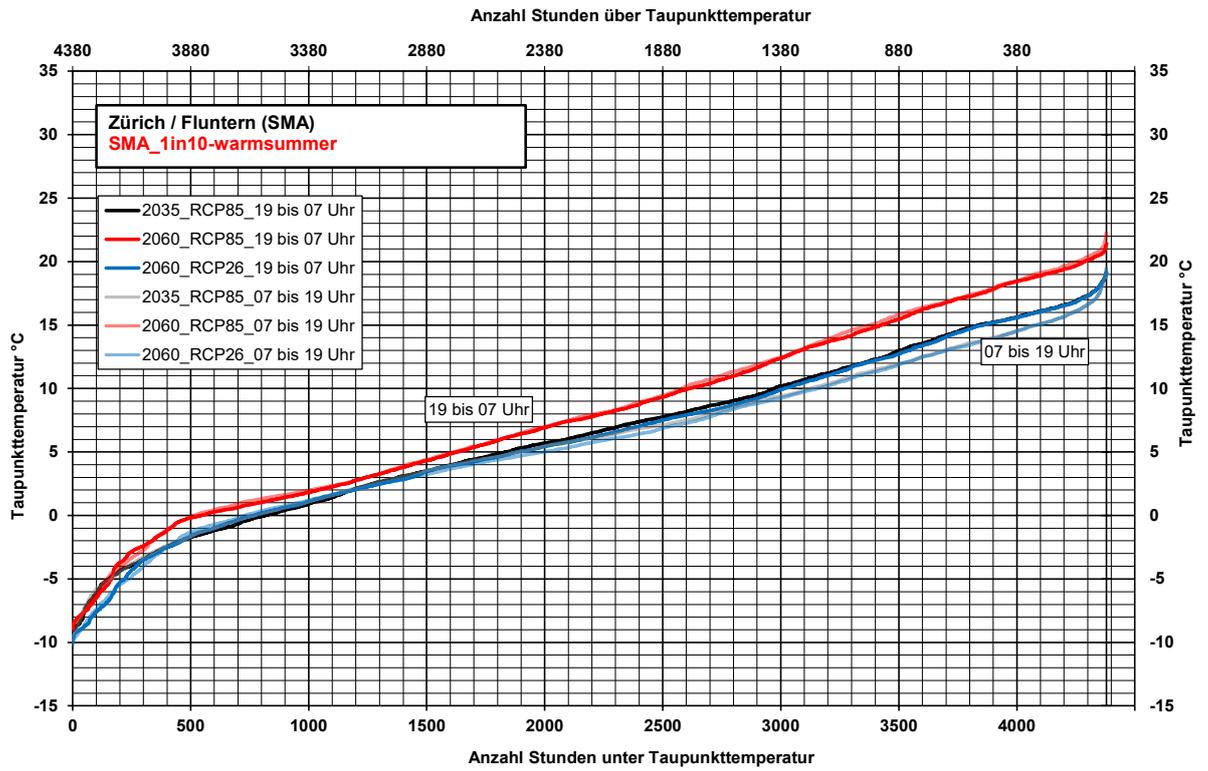


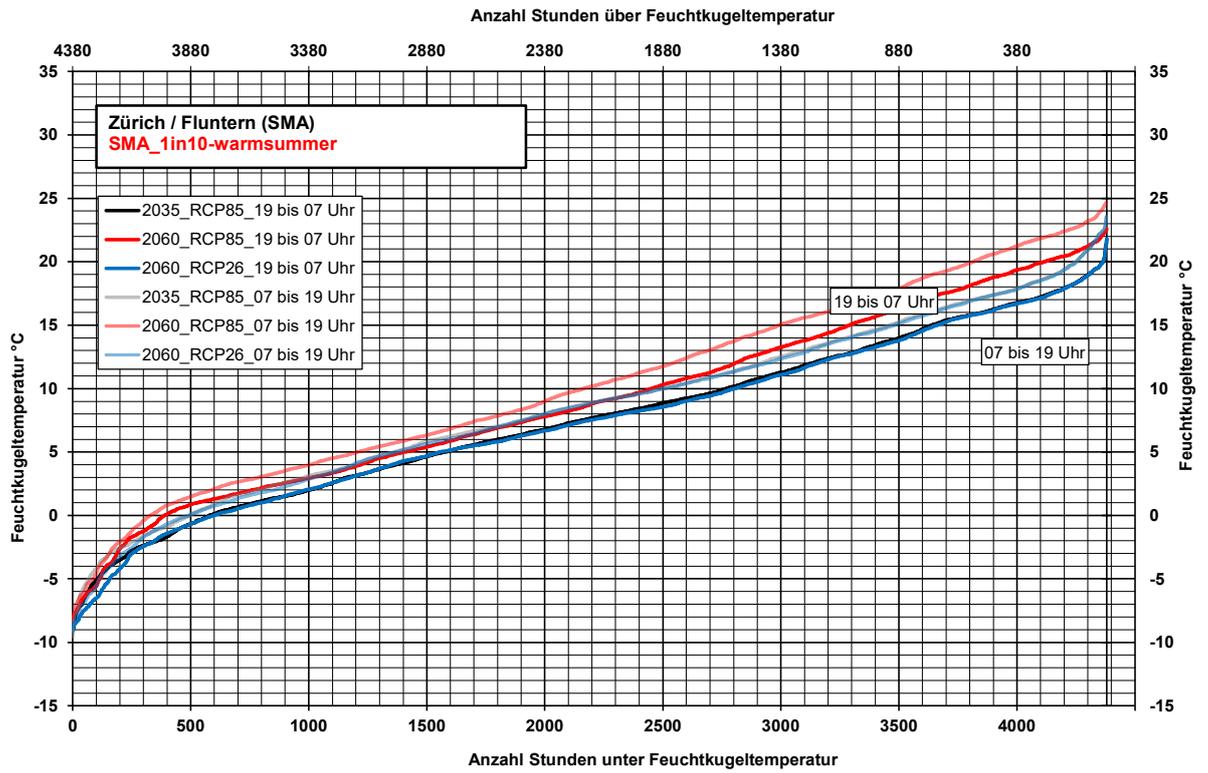
Station Zürich-Affoltern [Design Reference Year (DRY)]



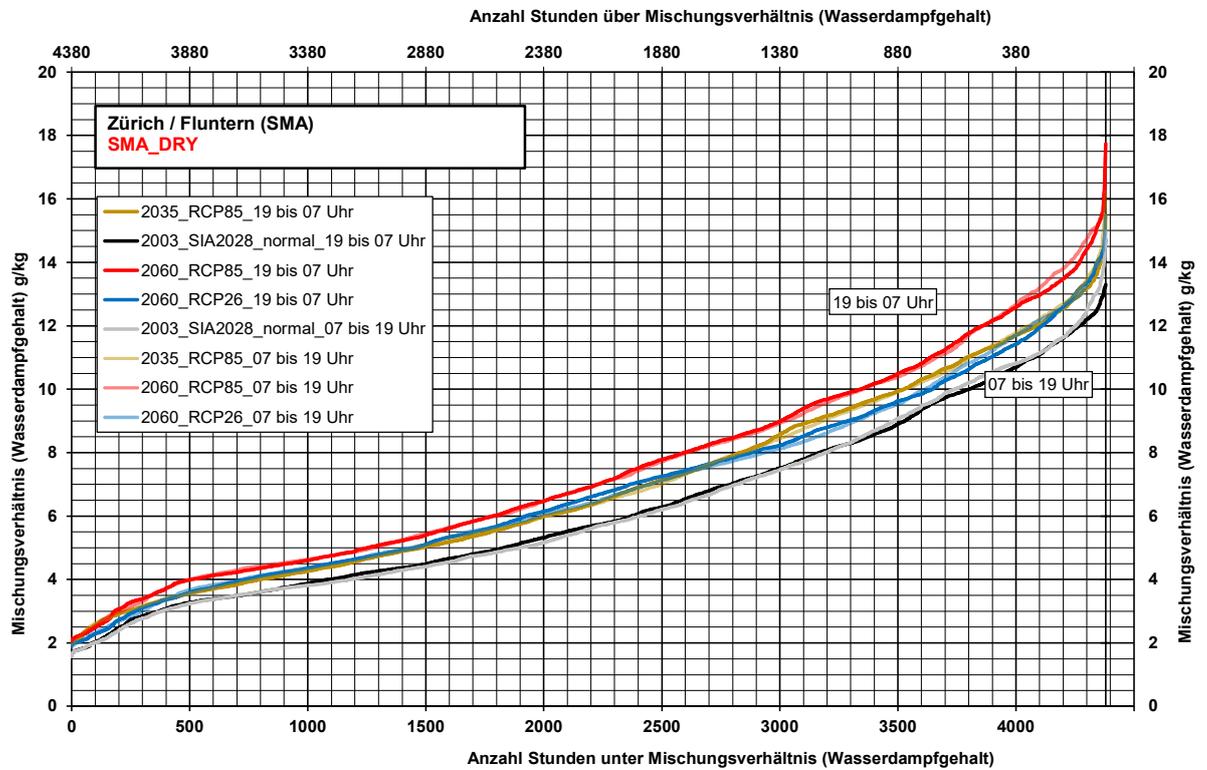
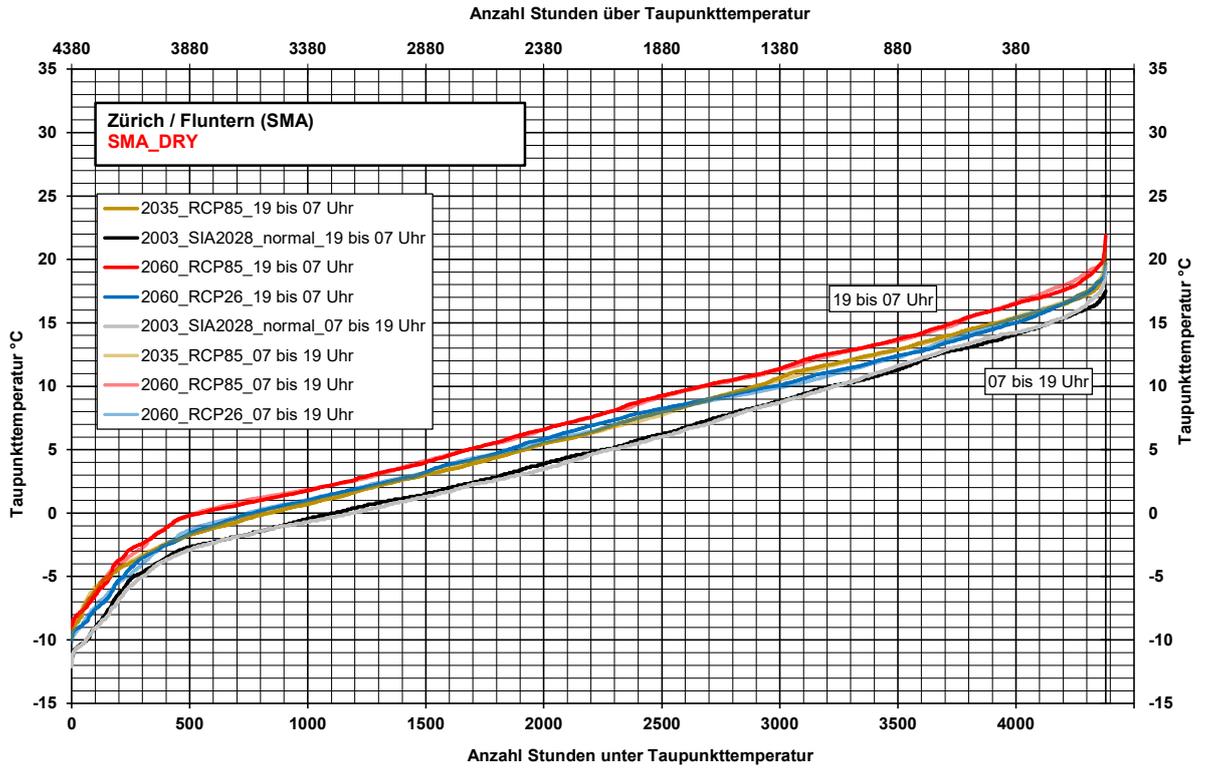


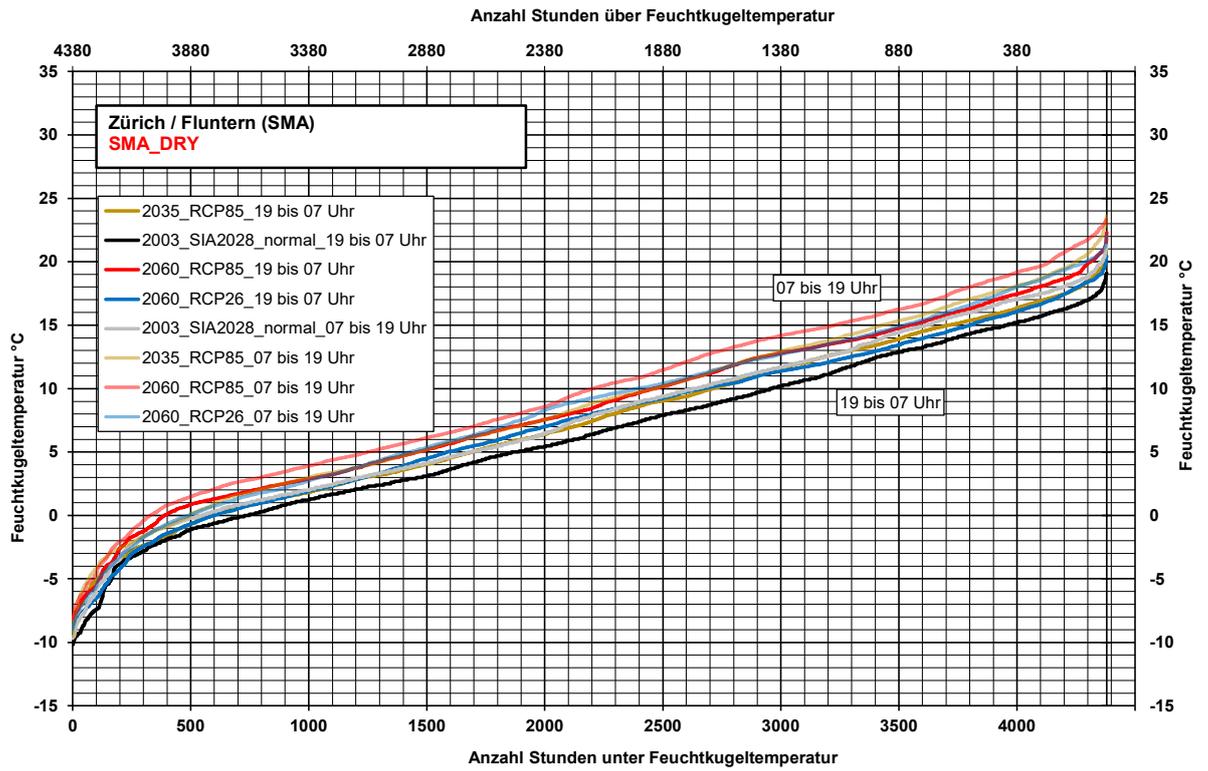
Station Zürich/Fluntern [1in10-warmsummer]



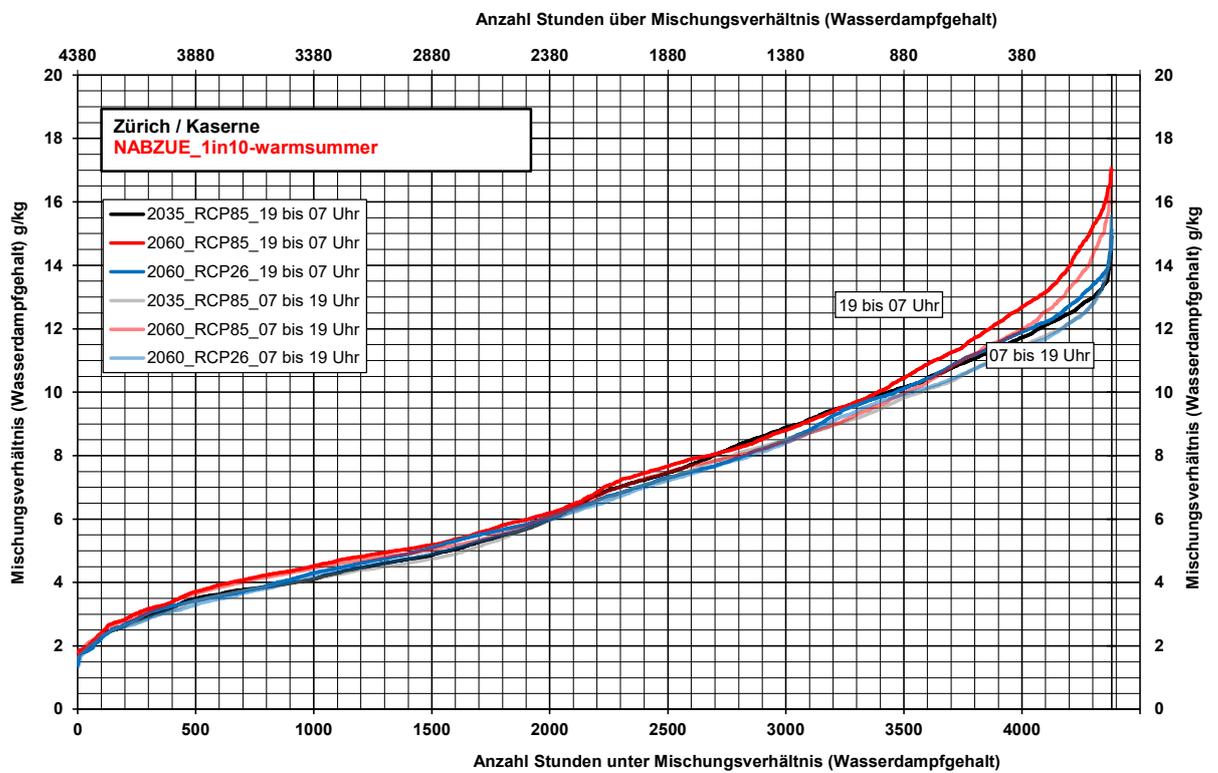
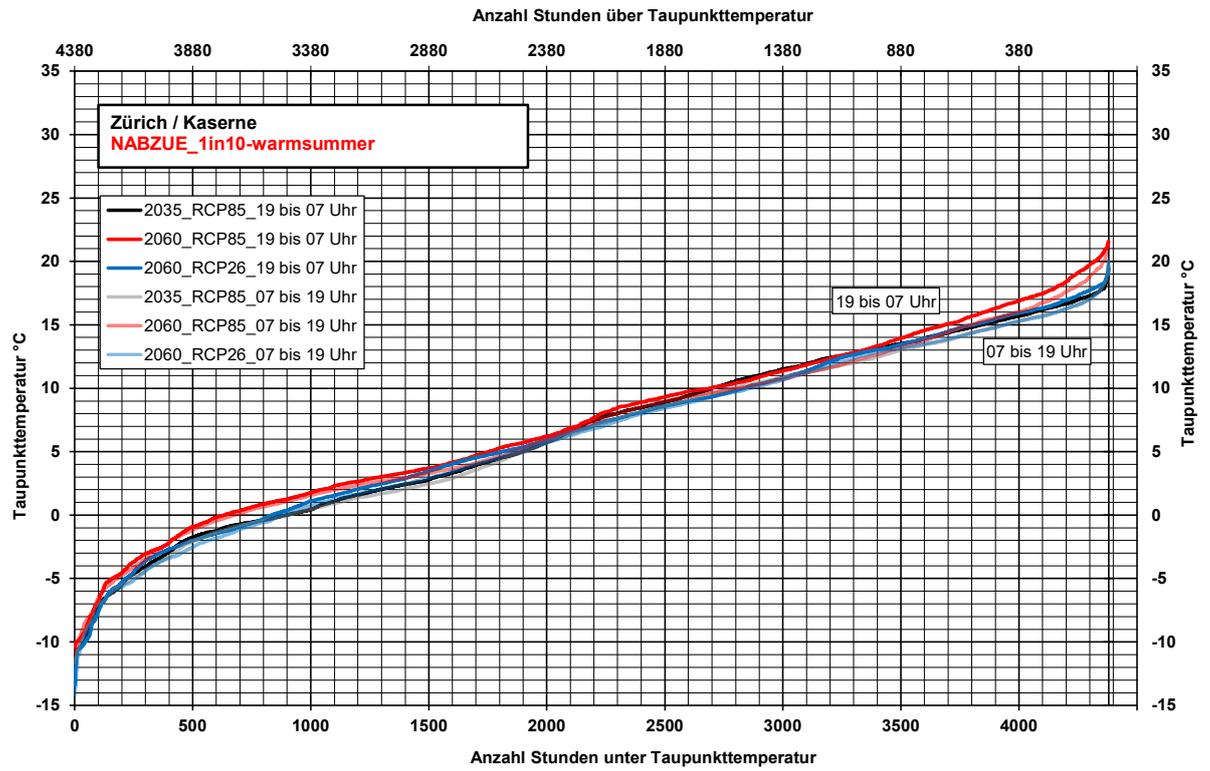


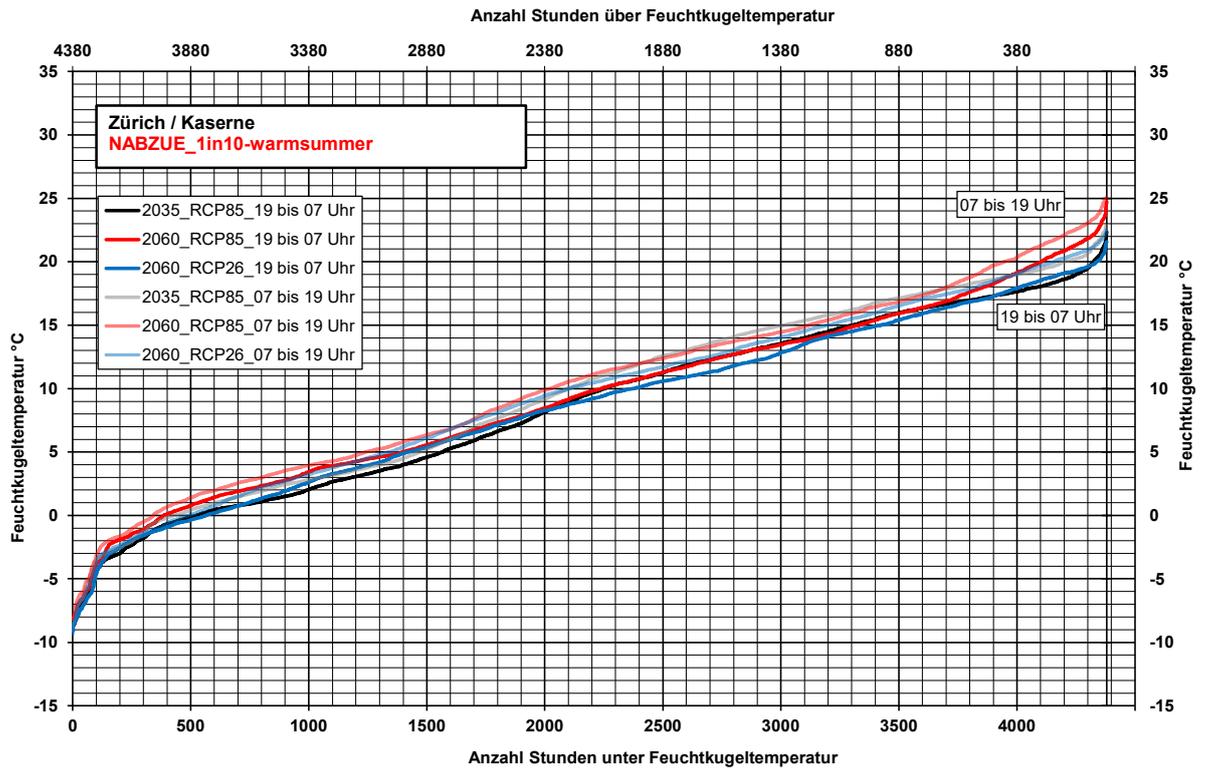
Station Zürich/Fluntern [Design Reference Year (DRY)]



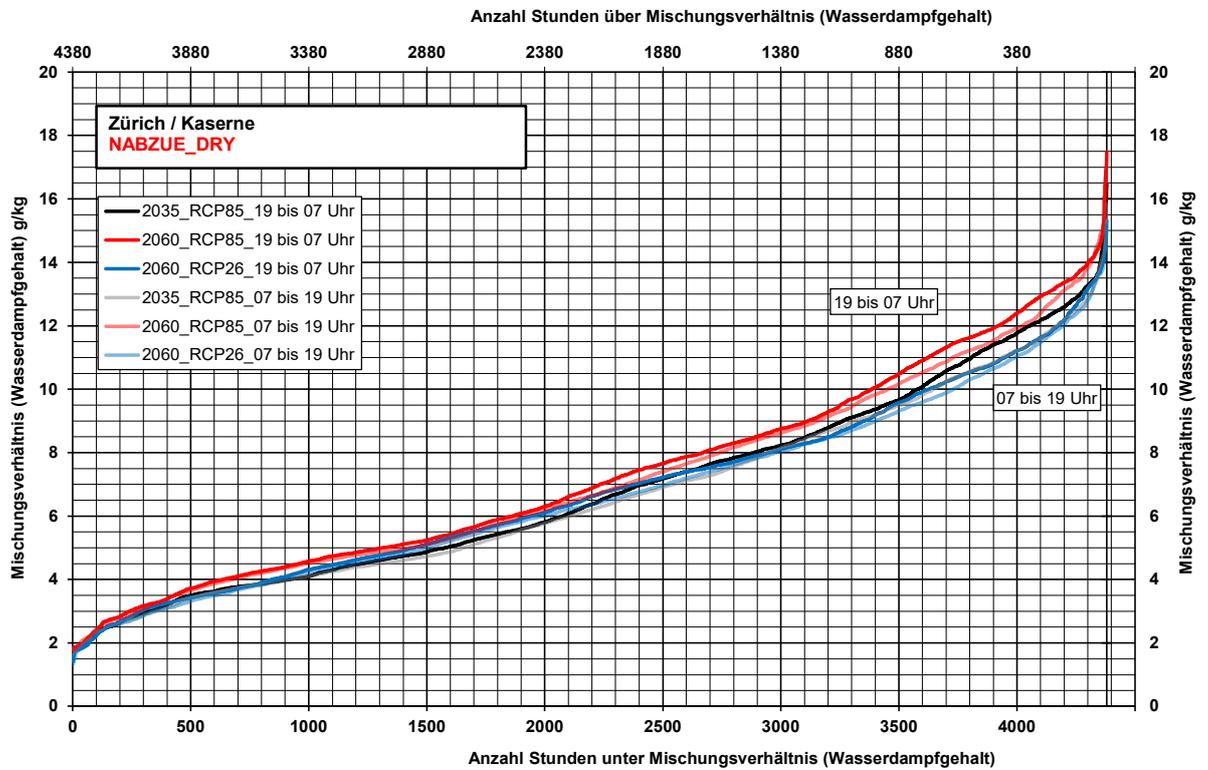
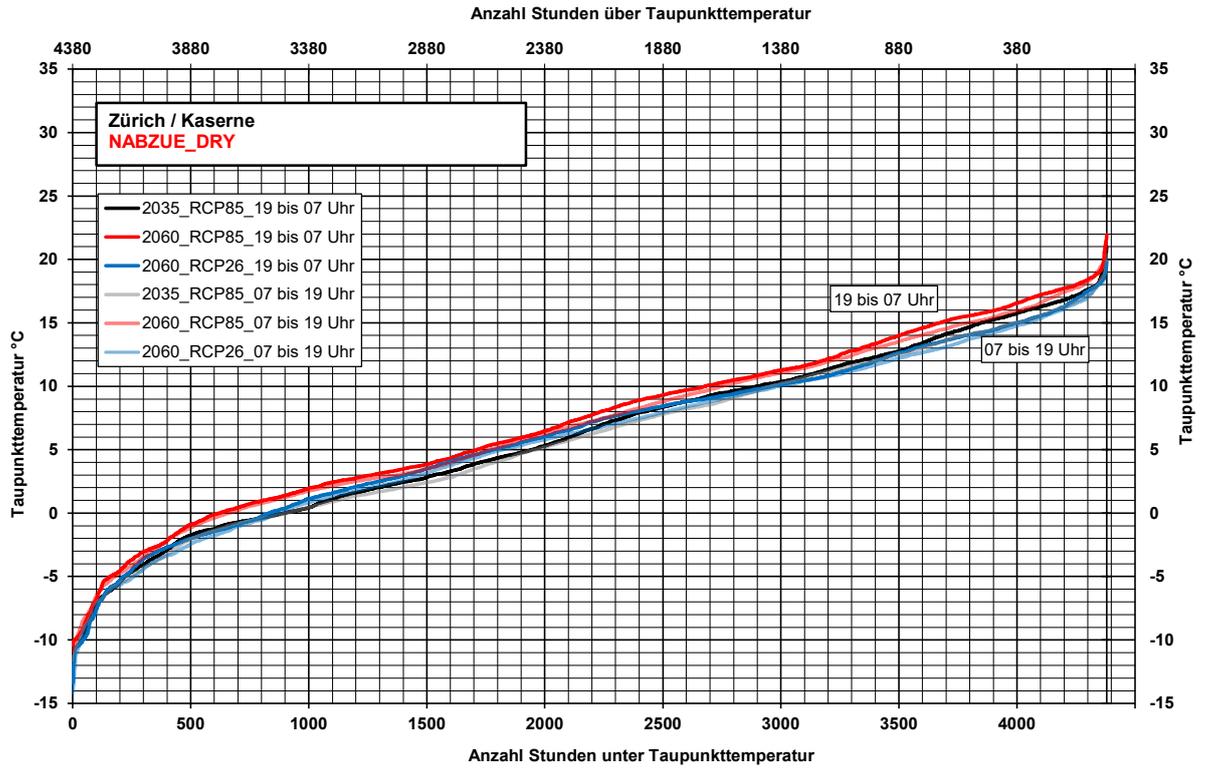


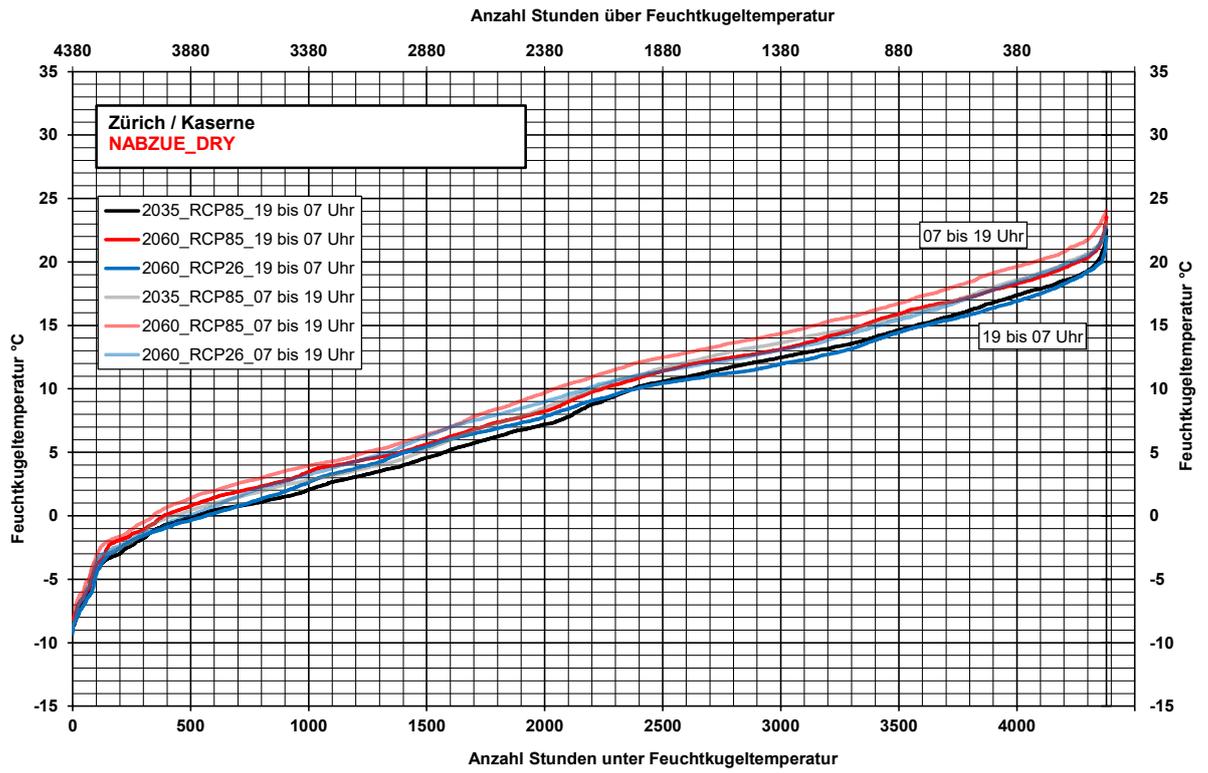
Station Zürich/Kaserne [1in10-warmsummer]



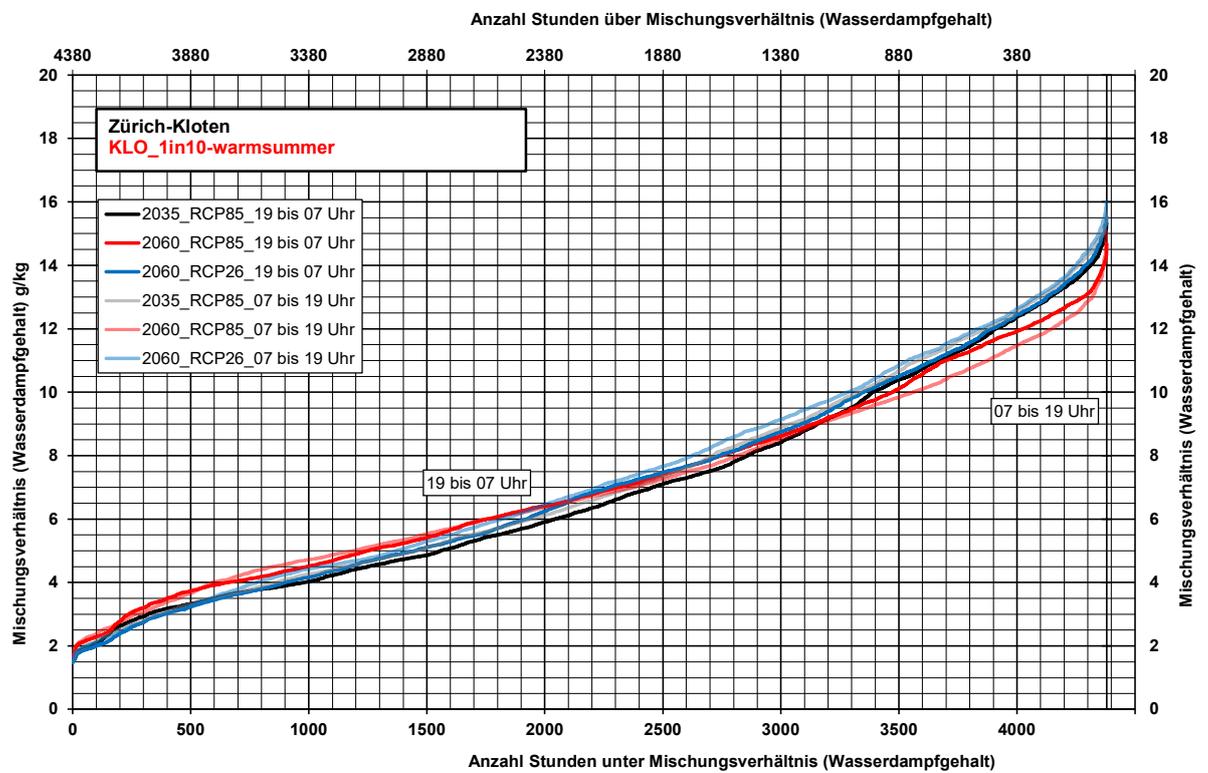
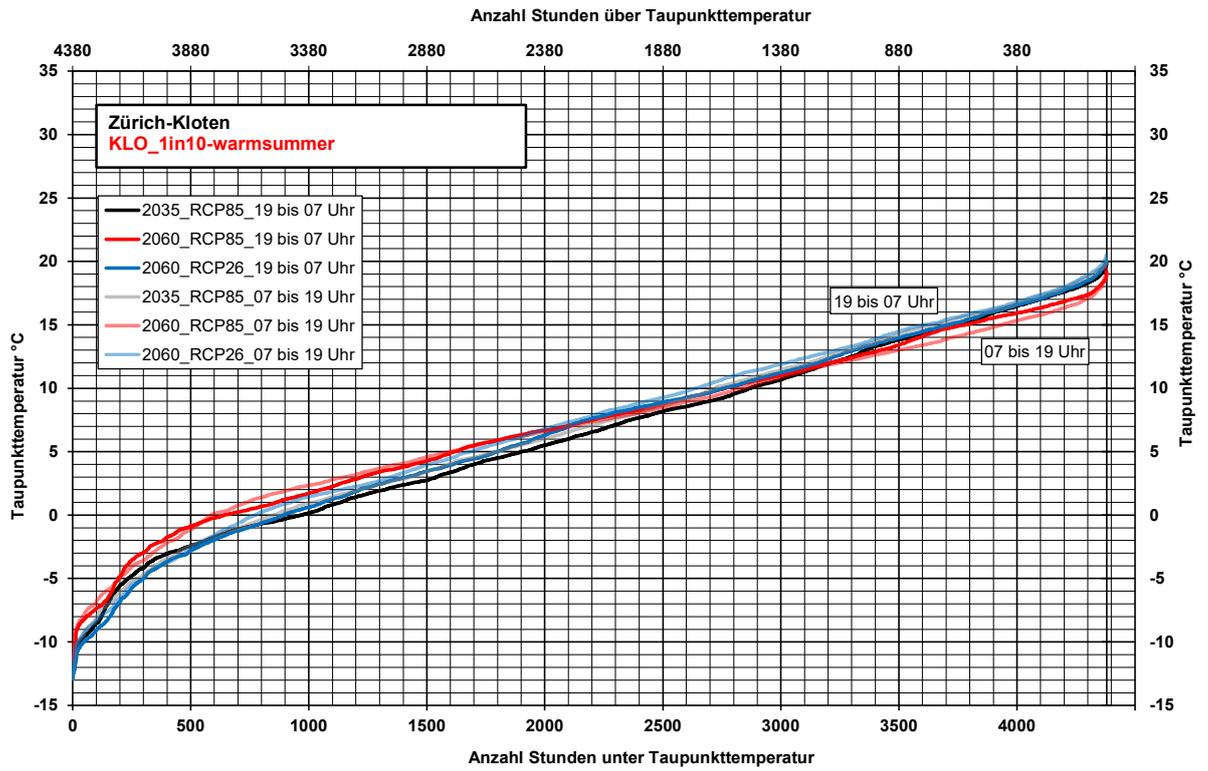


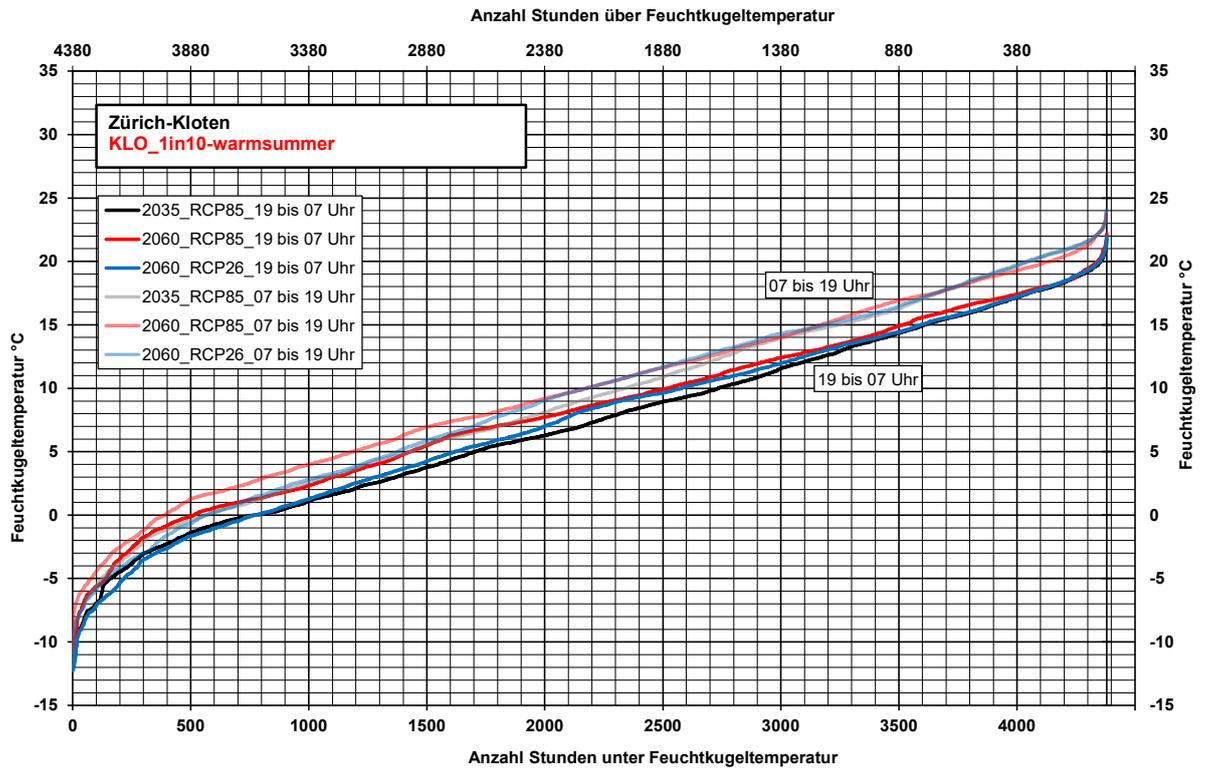
Station Zürich/Kaserne [Design Reference Year (DRY)]



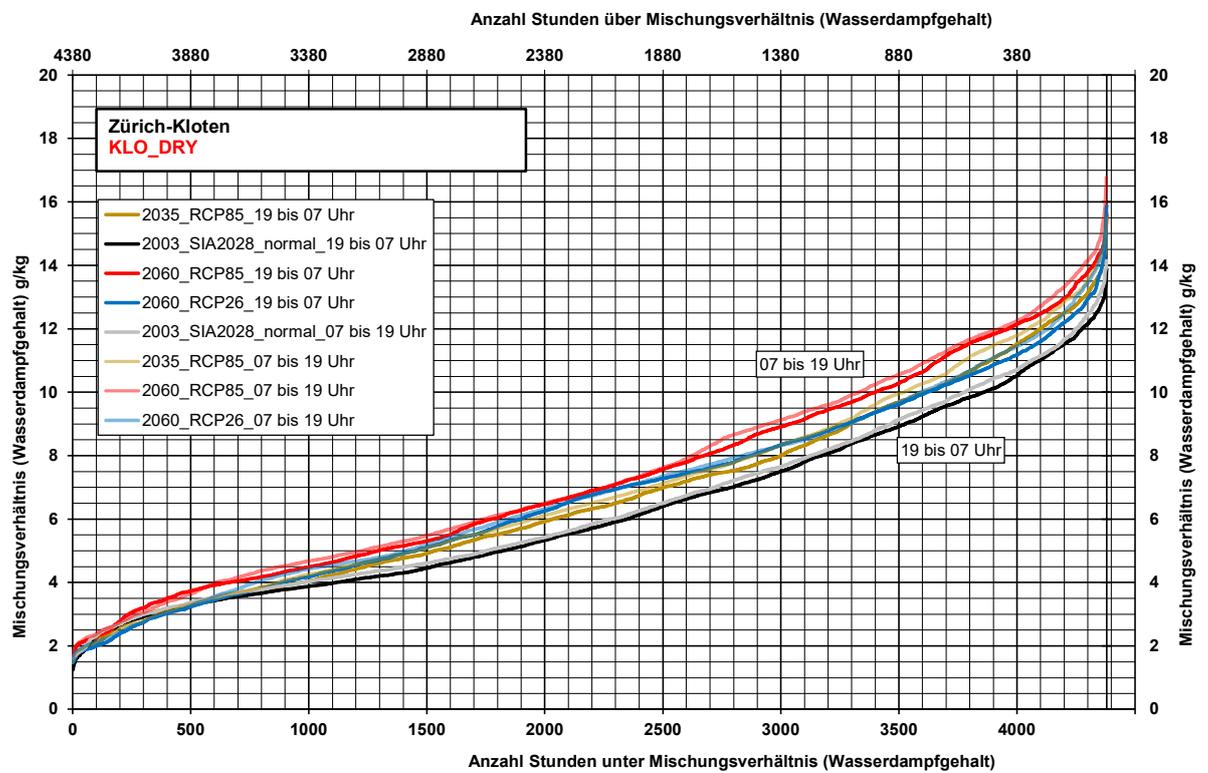
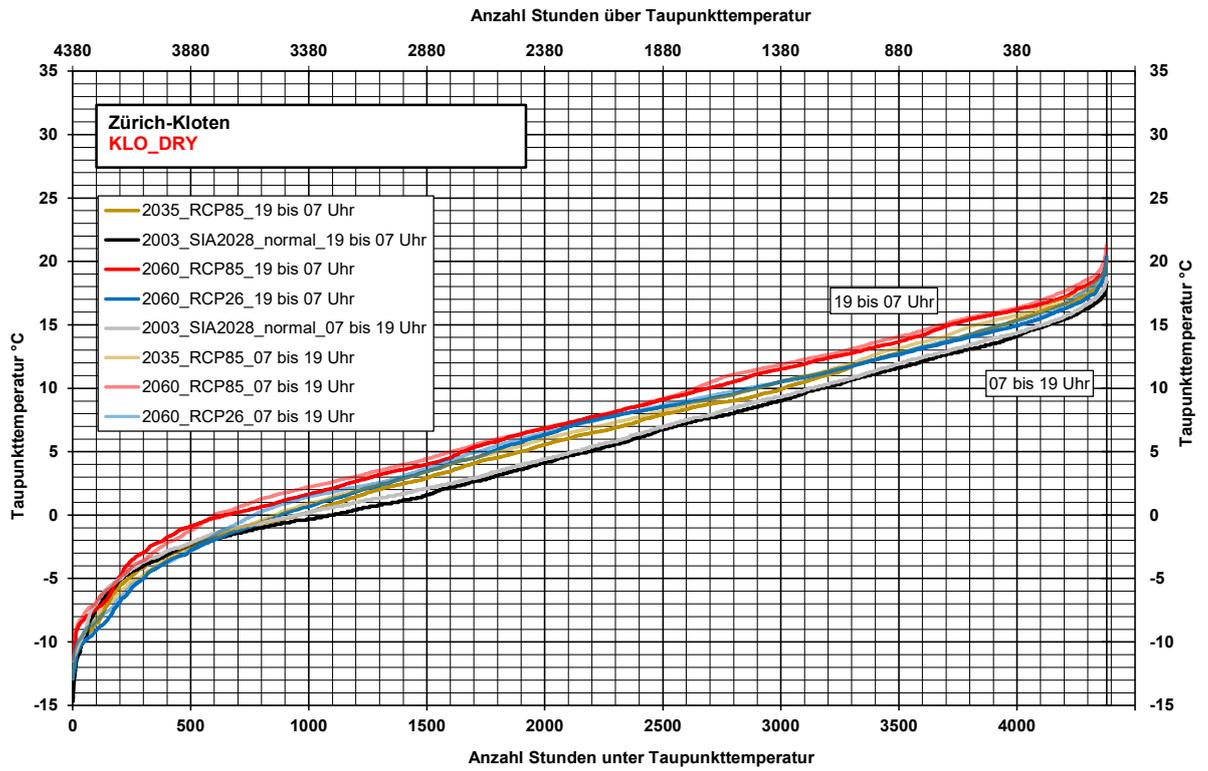


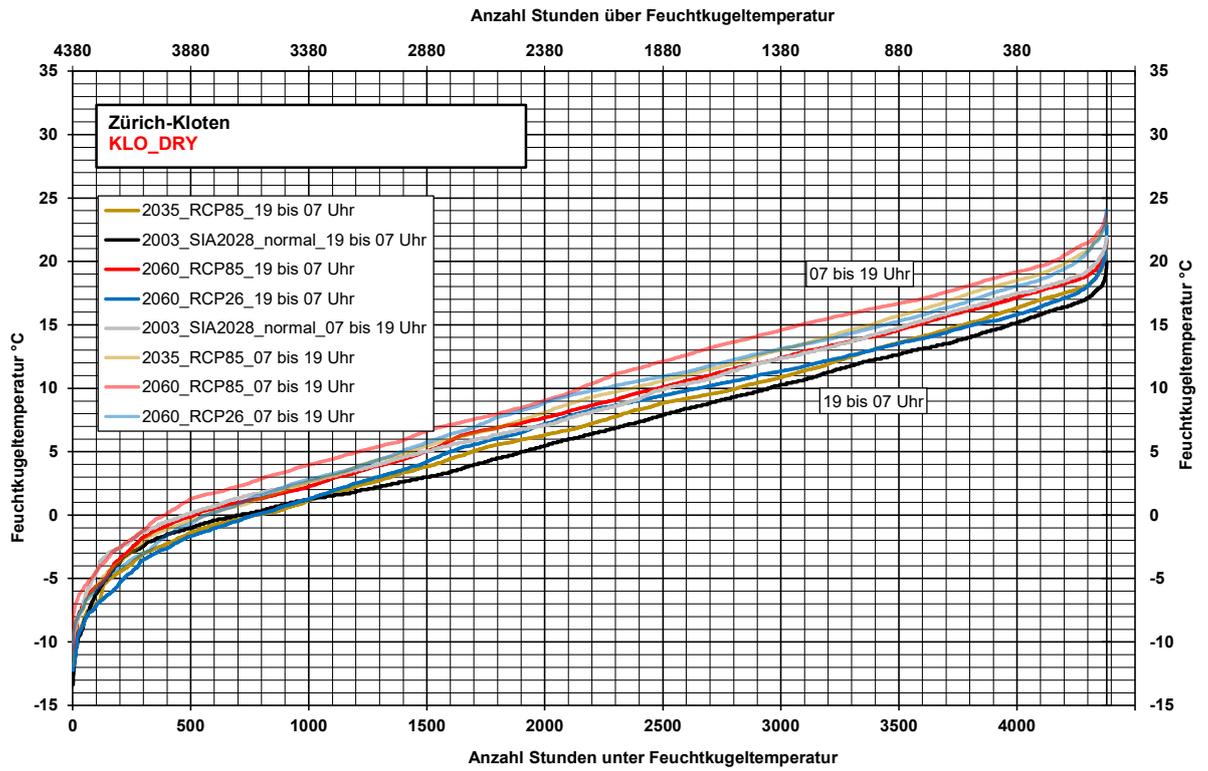
Station Zürich-Kloten [1in10-warmsummer]





Station Zürich-Kloten [Design Reference Year (DRY)]





6. Erkenntnisse und Fazit

Nachfolgend finden sich Auswertungen von Jahresstunden von den beiden Stationen Zürich/Fluntern (SMA) und Zürich/Kaserne für die Klimaszenarien 2030_RCP 8.5, 2060_RCP 2.6 und 2060_RCP 8.5.

Taupunkttemperatur

Beim Betrieb von Kühldecken sollte die Taupunkttemperatur der Raumluft (resp. der Aussenluft bei Fensterlüftung) nicht höher als die Kühloberflächentemperatur sein. Das zukünftige Klima wird gemäss Prognosen sowohl wärmer als auch feuchter werden. Dies muss bei der Auslegung der Kühlflächen berücksichtigt werden. Bezüglich thermischem Komfort werden folgende Taupunkttemperaturbereiche unterschieden:

Taupunkttemperatur	Komfortlevel
< 10 °C	etwas trocken
10 °C – 16 °C	trocken und komfortabel
16 °C – 18 °C	zunehmend stickig
18 °C – 21 °C	unkomfortabel, hoher Feuchtegehalt
> 21 °C	sehr unkomfortabel
> 24 °C	kritisch

Zürich/Fluntern (SMA)	Anzahl Stunden mit Taupunkttemperatur [°C]						
	Minimalwert	< 10	10-16	16-18	18-21	21-24	Maximalwert
SMA_2003_normal-hour	-12.1	6458	2098	195	9	0	19.4
SMA_2035_RCP8.5_DRY	-10.0	5807	2417	463	73	0	20.5
SMA_2060_RCP2.6_DRY	-10.2	6002	2244	428	86	0	19.7
SMA_2060_RCP8.5_DRY	-9.1	5356	2454	648	287	5	21.9

Zürich/Kaserne	Anzahl Stunden mit Taupunkttemperatur [°C]						
	Minimalwert	< 10	10-16	16-18	18-21	21-24	Maximalwert
NABZUE_2035_RCP8.5_DRY	-11.6	5856	2342	481	80	1	21.0
NABZUE_2060_RCP2.6_DRY	-14.2	5957	2398	336	69	0	19.9
NABZUE_2060_RCP8.5_DRY	-10.9	5429	2493	611	218	9	21.9

Bei der Station Zürich/Fluntern (SMA) erhöht sich die Anzahl der Jahresstunden im Taupunkttemperaturbereich von 18-21 °C seit 2003 um Faktoren. Ohne Gegenmassnahmen wird dort bis 2060 eine beträchtliche Anzahl Stunden mit Schwüleempfinden zu verzeichnen sein. Ebenso wird die Möglichkeit von Fensterlüftung resp. natürlicher Lüftung mit gleichzeitigem Betrieb von Kühldecken erheblich eingeschränkt. Diese Beobachtungen gelten auch für die Station

Zürich/Kaserne. Bezüglich Unterschiede zwischen Tag/Nacht wird auf die entsprechenden Summenhäufigkeitsdiagramme verwiesen.

Feuchtkugeltemperatur

Die Feuchtkugeltemperatur beeinflusst die Wirtschaftlichkeit von Rückkühlssystemen mit dem Verdunstungsprinzip massgeblich.

Zürich/Fluntern (SMA)	Anzahl Stunden mit Feuchtkugeltemperatur über [h]					
24h	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	Max.
SMA_2003_normal-hour	85	32	6	0	0	21.7
SMA_2035_RCP8.5_DRY	284	143	63	21	4	23.6
SMA_2060_RCP2.6_DRY	253	91	12	1	0	22.1
SMA_2060_RCP8.5_DRY	544	308	164	64	10	23.3

Zürich/Kaserne	Anzahl Stunden mit Feuchtkugeltemperatur über [h]					
24h	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	Max.
NABZUE_2035_RCP8.5_DRY	413	207	68	17	1	23.1
NABZUE_2060_RCP2.6_DRY	390	164	49	13	0	22.7
NABZUE_2060_RCP8.5_DRY	751	428	201	81	30	24.1

Ohne Gegenmassnahmen wird die Rückkühlung inskünftig an beiden Stationen massgeblich negativ beeinflusst.

Befeuchtung und Entfeuchtung

Nachfolgend werden sogenannte Be- und Entfeuchtungsgrammstunden berechnet. Das Verfahren entstammt der Norm DIN 4710:2003 resp. der Richtlinie VDI 4710-3:2011. Mit der Verdampfungswärme von Wasser könnte in einem weiteren Schritt die Entfeuchtungsleistung (latente Kühlleistung) berechnet werden. Ebenso die Befeuchtungsleistung (latente Heizleistung).

Mittels thermischer Gebäudesimulation kann im Stundenschritt die erforderliche Zuluftfeuchte unter Berücksichtigung der Raumlufffeuchte bestimmt werden. Solche Berechnungen sollen in einem späteren BFE-Projekt zur Feuchterückgewinnung vorgenommen werden (Status: BFE-Projektskizze wurde per 28. März 2022 eingereicht).

Befeuchtungsstunden ergeben sich aus der Prüfung, ob in der betreffenden Stunde eine positive Differenz zwischen dem Wassergehalt der Zuluft (Sollwert) und dem Wassergehalt der Aussenluft besteht.

Befeuchtungsgrammstunden sind das Produkt aus den Befeuchtungsstunden und der Differenz zwischen dem Wasserdampfgehalt der Zuluft und dem Wassergehalt der Aussenluft.

Entfeuchtungsstunden ergeben sich aus der Prüfung, ob in der betreffenden Stunde eine negative Differenz zwischen dem Wassergehalt der Zuluft (Sollwert) und dem Wassergehalt der Aussenluft besteht.

Entfeuchtungsgrammstunden sind sinngemäss das Produkt aus den Befeuchtungsstunden und der Differenz zwischen dem Wassergehalt der Aussenluft und dem Wasserdampfgehalt der Zuluft.

Vereinfacht wird hier in beiden Fällen angenommen, dass der Wasserdampfgehalt der Zuluft und der Wasserdampfgehalt der Raumluff identisch ist.

Für die Stationen Zürich/Fluntern (SMA) und Zürich/Kaserne wurden die charakteristischen Stundenwerte für die Befeuchtung und Entfeuchtung für die Klimaszenarien ermittelt. Betrachtet wird der Zeitraum von 07 bis 19 Uhr.

Für die Station Zürich/Fluntern (SMA) wurde zusätzlich auch das Normaljahr nach SIA 2028:2010 angegeben. Dies ist bei der Station Zürich/Kaserne nicht möglich, dass es sich um eine neu definierte Station mit Hitzeinseleffekt handelt.

Die anfallenden Befeuchtungs- und Entfeuchtungsgrammstunden hängen nicht nur vom Aussenklima ab. Die Komfortanforderungen – heutige und zukünftige- beeinflussen den energetischen Aufwand für Be- und Entfeuchtung ebenfalls massgeblich.

Station Zürich/Fluntern (SMA)

SMA_2003_normal-hour	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G _{tr}	-	6507	4476	2944	1795	964	421	142	14
Entfeuchtungsstunden	-	2369	1727	1316	986	689	399	171	23
Befeuchtungsgrammstunden G _f	1620	3312	5661	8509	11739	15289	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1361	2011	2653	3064	3394	3691	-	-	-

SMA_2035_RCP8.5_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G _{tr}	-	7689	5574	3853	2492	1469	772	323	38
Entfeuchtungsstunden	-	2372	1882	1537	1195	855	575	325	59
Befeuchtungsgrammstunden G _f	1707	3450	5714	8374	11392	14750	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1450	2008	2498	2843	3185	3525	-	-	-

SMA_2060_RCP2.6_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G _{tr}	-	7338	5183	3485	2254	1354	703	282	24
Entfeuchtungsstunden	-	2395	1926	1443	1057	760	532	316	50
Befeuchtungsgrammstunden G _f	1699	3401	5626	8308	11456	14936	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1435	1985	2454	2937	3323	3620	-	-	-

SMA_2060_RCP8.5_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G _{tr}	-	9308	6946	4989	3438	2239	1382	771	177
Entfeuchtungsstunden	-	2582	2148	1771	1352	1028	719	518	202
Befeuchtungsgrammstunden G _f	1319	2850	4868	7291	10120	13302	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1279	1798	2232	2609	3028	3352	-	-	-

Station Zürich/Kaserne

NABZUE_2035_RCP8.5_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G_{tr}	-	6882	4827	3220	1973	1093	500	187	21
Entfeuchtungsstunden	-	2269	1833	1432	1068	732	443	212	34
Befeuchtungsgrammstunden G_f	2068	3947	6272	9045	12178	15677	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1658	2111	2547	2948	3312	3648	-	-	-

NABZUE_2060_RCP2.6_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G_{tr}	-	6686	4569	2935	1766	955	435	157	9
Entfeuchtungsstunden	-	2381	1867	1403	976	648	387	183	20
Befeuchtungsgrammstunden G_f	1996	3735	5998	8744	11955	15523	-	-	-
Befeuchtungsstunden	1511	1999	2513	2977	3404	3732	-	-	-

NABZUE_2060_RCP8.5_DRY	Zuluftfeuchte [g/kg]								
07 bis 19 Uhr	5	6	7	8	9	10	11	12	13.7
Entfeuchtungsgrammstunden G_{tr}	-	8317	6068	4230	2798	1725	939	442	77
Entfeuchtungsstunden	-	2484	2038	1638	1223	924	652	356	93
Befeuchtungsgrammstunden G_f	1602	3289	5420	7962	10910	14217			
Befeuchtungsstunden	1428	1896	2342	2742	3157	3456			

Der Wert von 13.7 g/kg stammt aus der SIA 382/1:2014 (Ziffer 2.2.7.1). Derzeit wird die SIA 382/1:2014 revidiert. Dort ist vorgesehen, dass für die Bemessung der Be- und Entfeuchtung kategorienweise Werte angegeben werden sollen.

Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Auftragsarbeit legen nahe, dass die Themen Feuchte und Feuchterückgewinnung noch vertiefter zu untersuchen sind. Damit soll sichergestellt werden, dass Gebäude und die gebäudetechnischen Anlagen robust auf den Klimawandel und sich verändernde Komfortbedürfnisse reagieren können. Bei thermischen und hygrischen Simulationen sollten inskünftig Unsicherheiten in Form von Intervallbereichen zu robusteren Aussagen verhelfen.

Der Berichtersteller bedankt sich beim Auftraggeber für diesen geschätzten Auftrag.

*Die elektronisch erfassten Daten werden während 3 Jahren gespeichert. Der Bericht und die zugehörigen Dokumente werden bei FREI WÜEST EXPERT während 10 Jahren archiviert.
Der Auftraggeber kann während dieser Zeit die Dokumente einsehen. Der Aufwand beim Erstellen von Kopien wird dem Kunden verrechnet.*

Willisau, 20. Februar 2023



Beat Frei

Dipl. HLK Ing. HTL / ASHRAE VDI ISIAQ
Geschäftsinhaber

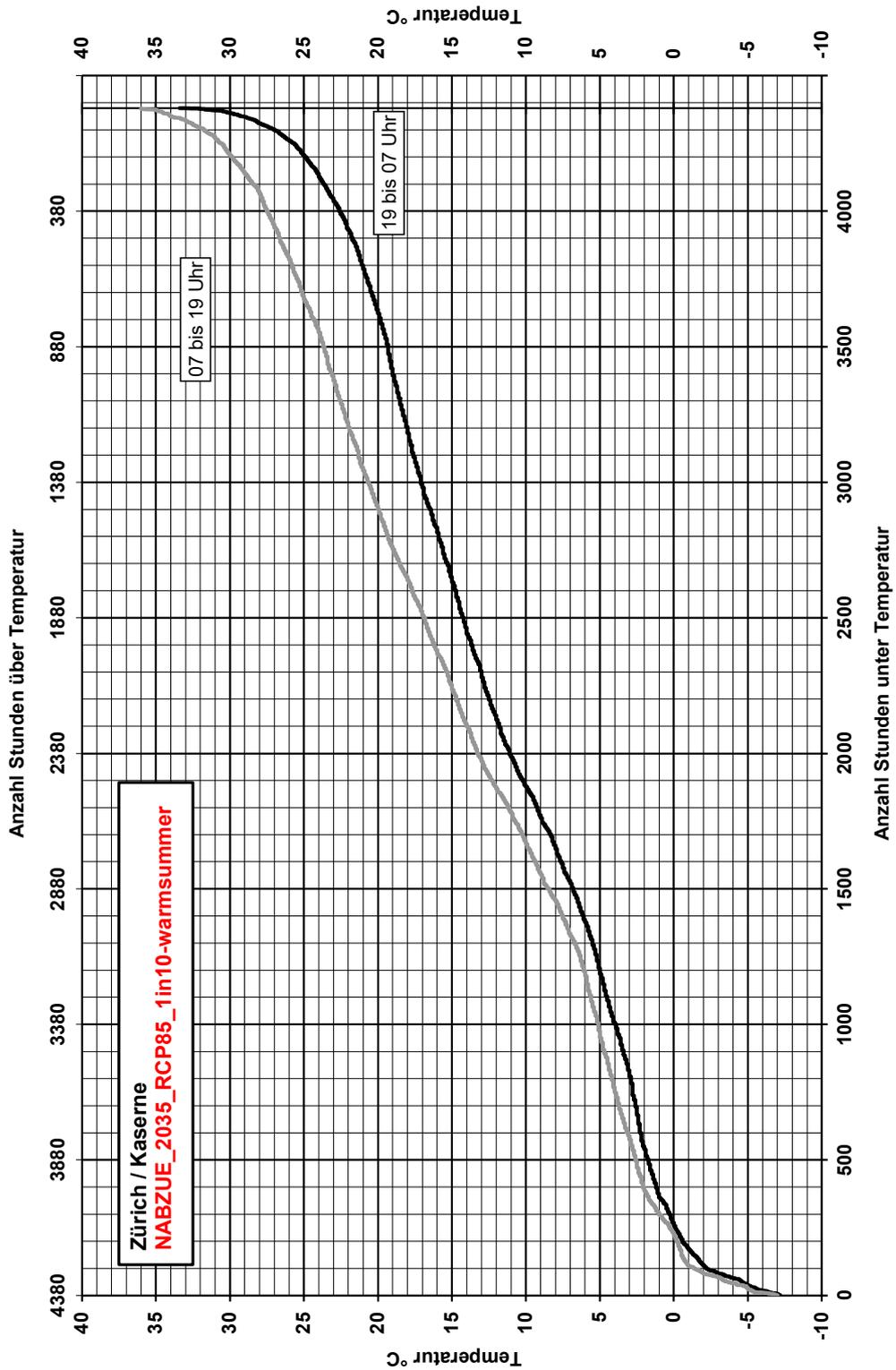
**FREI WÜEST EXPERT
INGENIEURBÜRO**

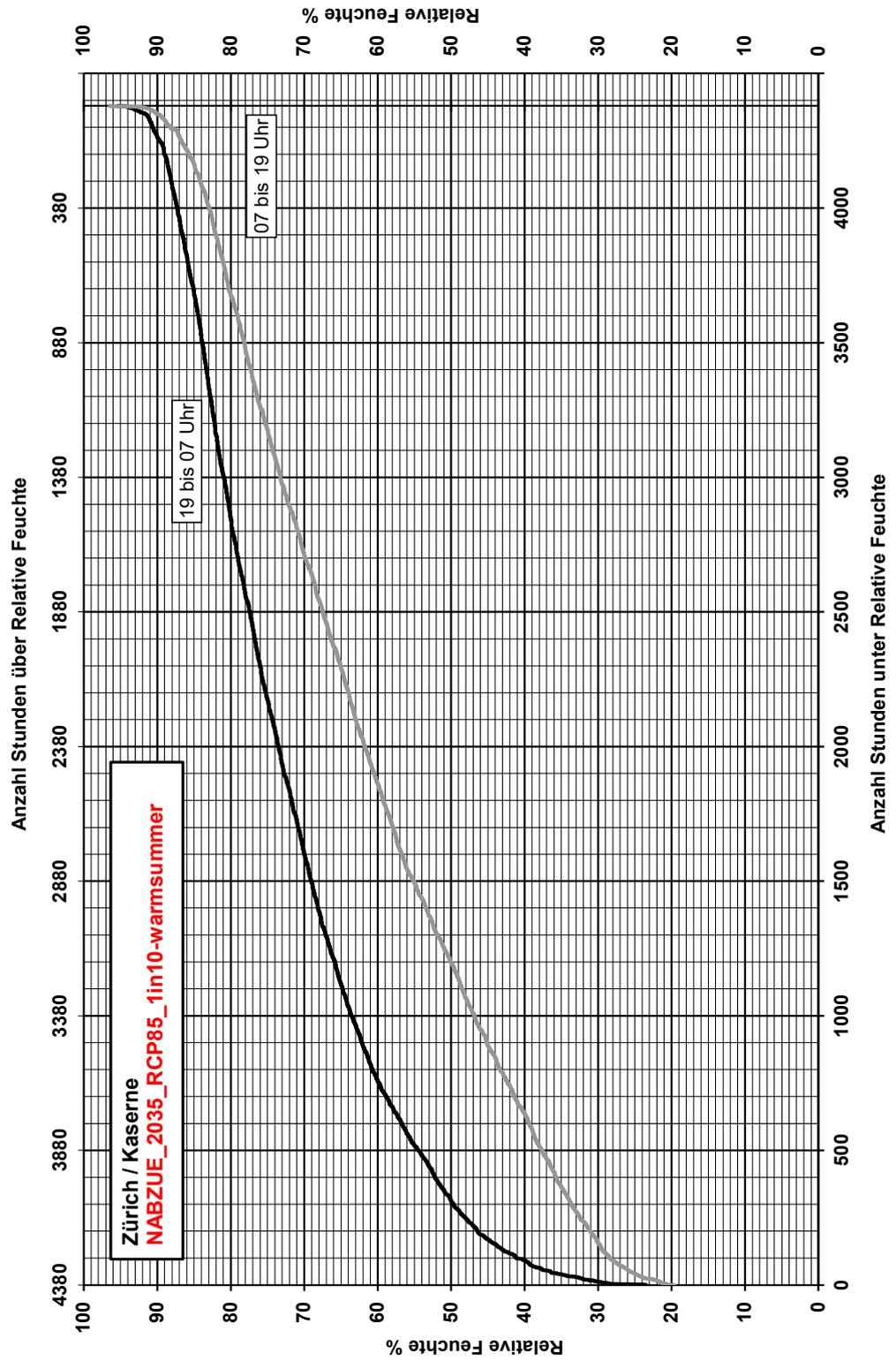
Gutachten – Expertisen – Forschung – Normierung
Geissburghalde 11
CH-6130 Willisau
Tel. +41 76 313 00 93
beat.frei@frei.expert

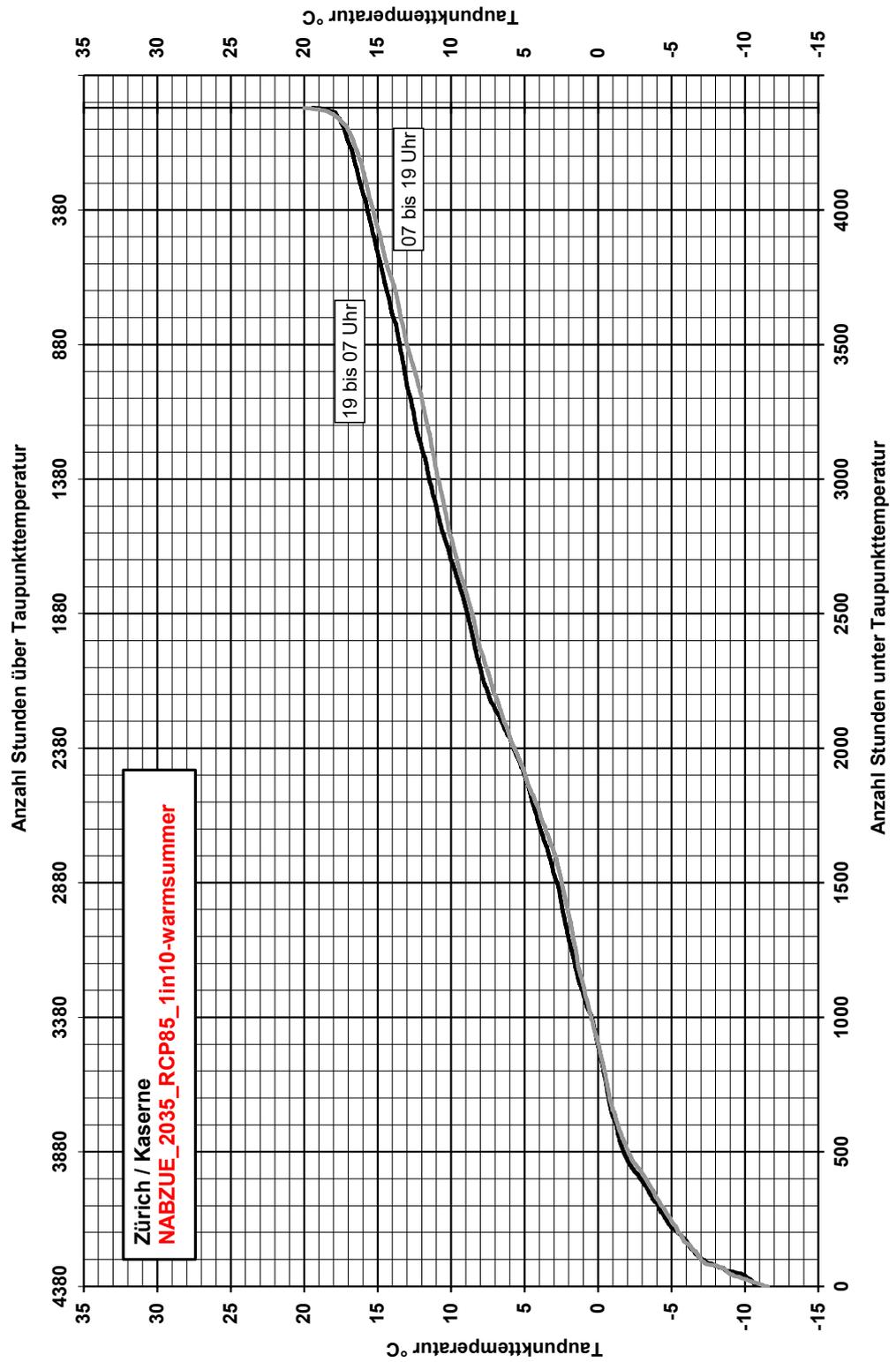
7. Anhang Summenhäufigkeitsdiagramme aus den Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima der Stadtregion Zürich

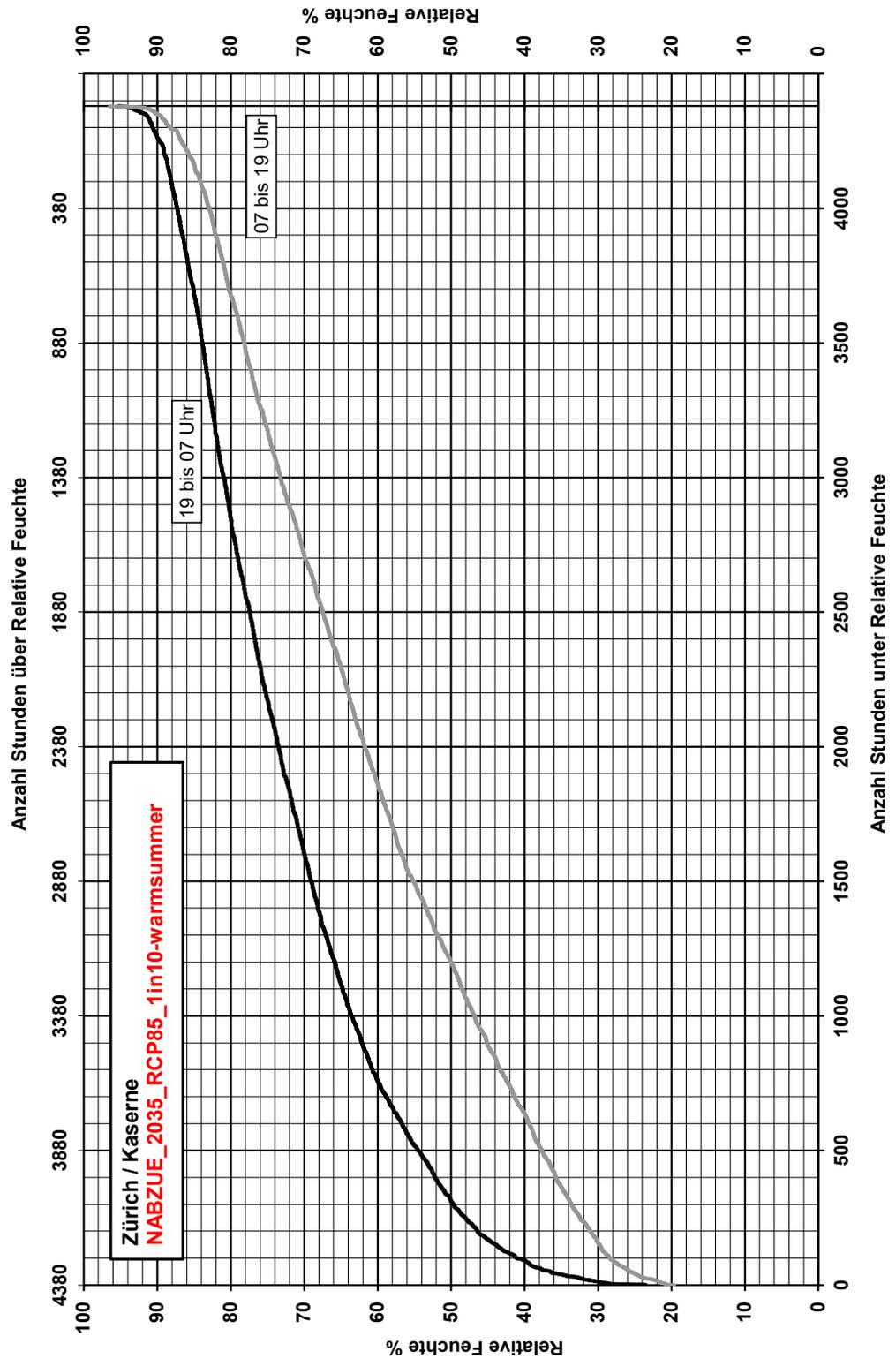
**Zürich / Kaserne (NABZUE) 2035 RCP85 1in10warmsummer
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2035 RCP85 DRY
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP26 1in10-warmsummer
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP26 DRY
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP85 1in10warmsummer
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP85 DRY**

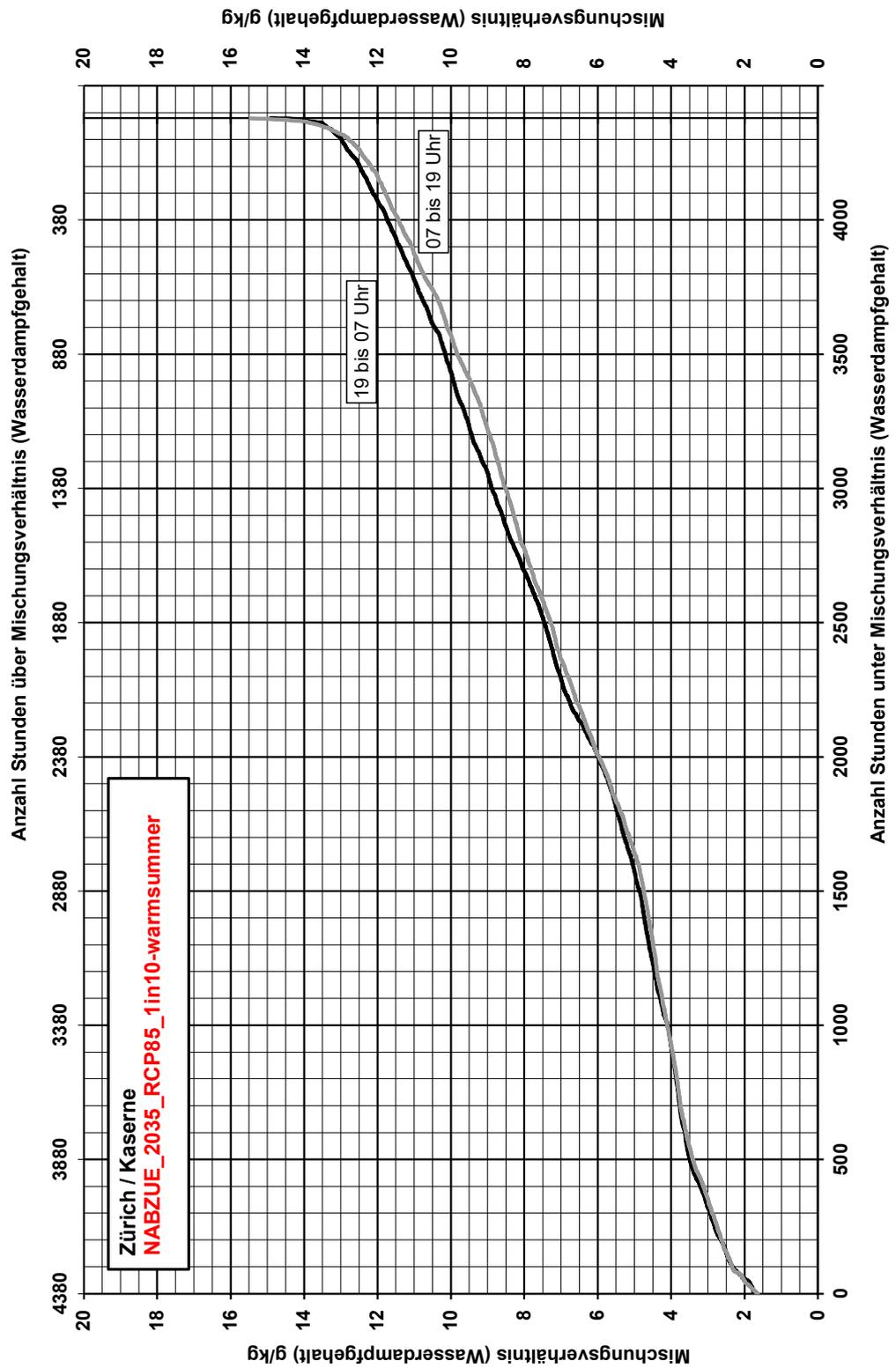
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2035 RCP85 1in10warmsummer

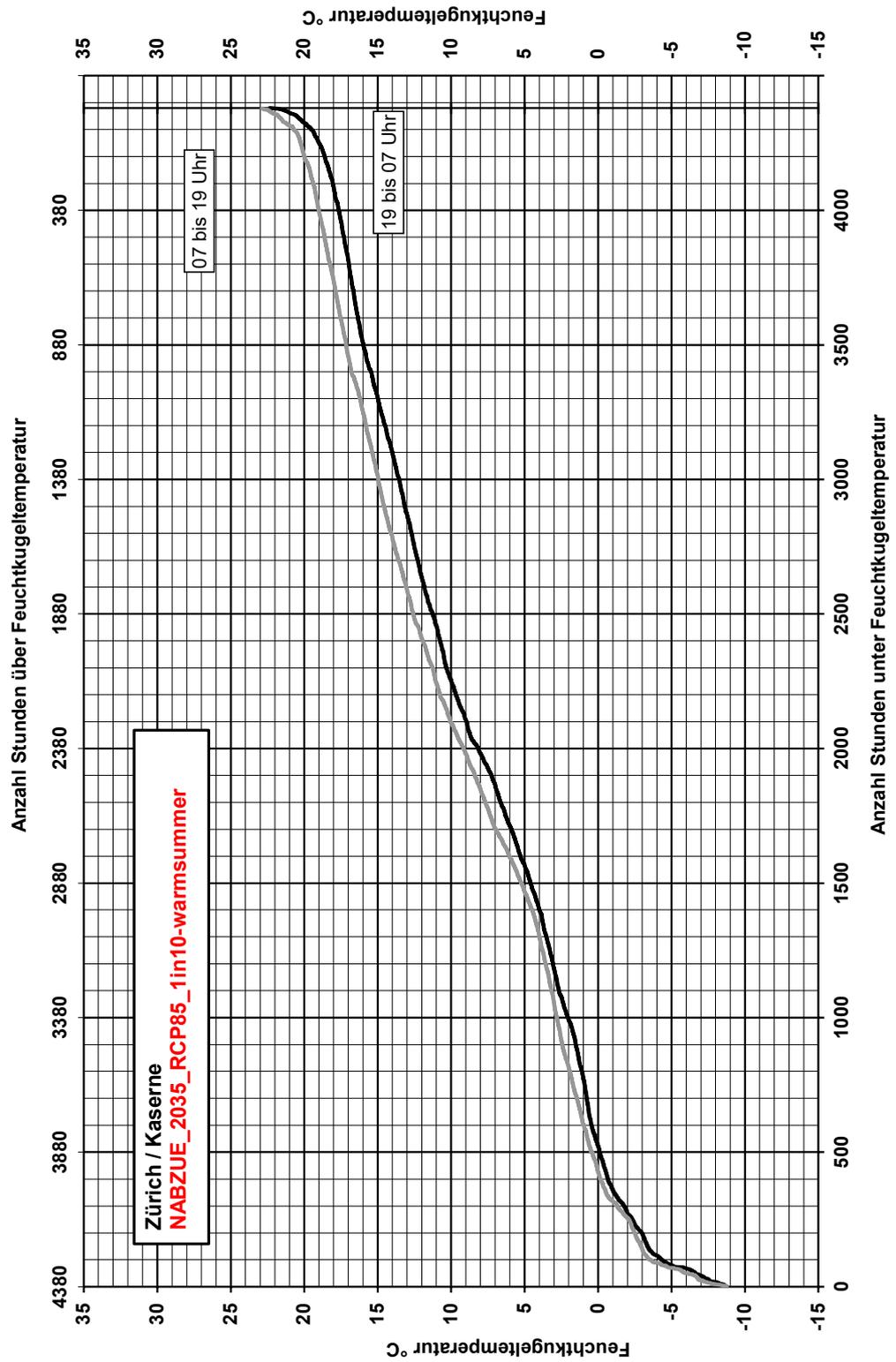




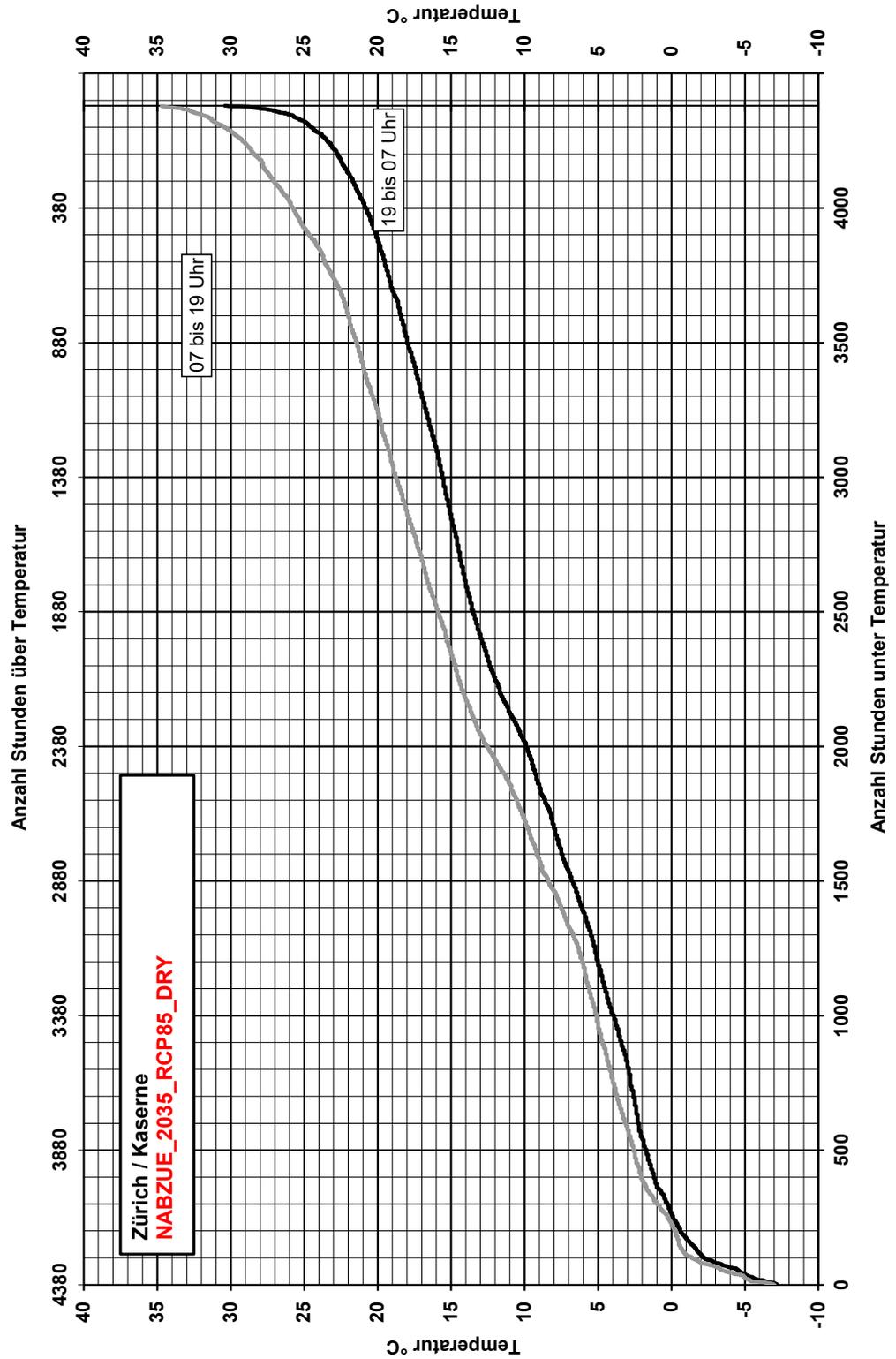


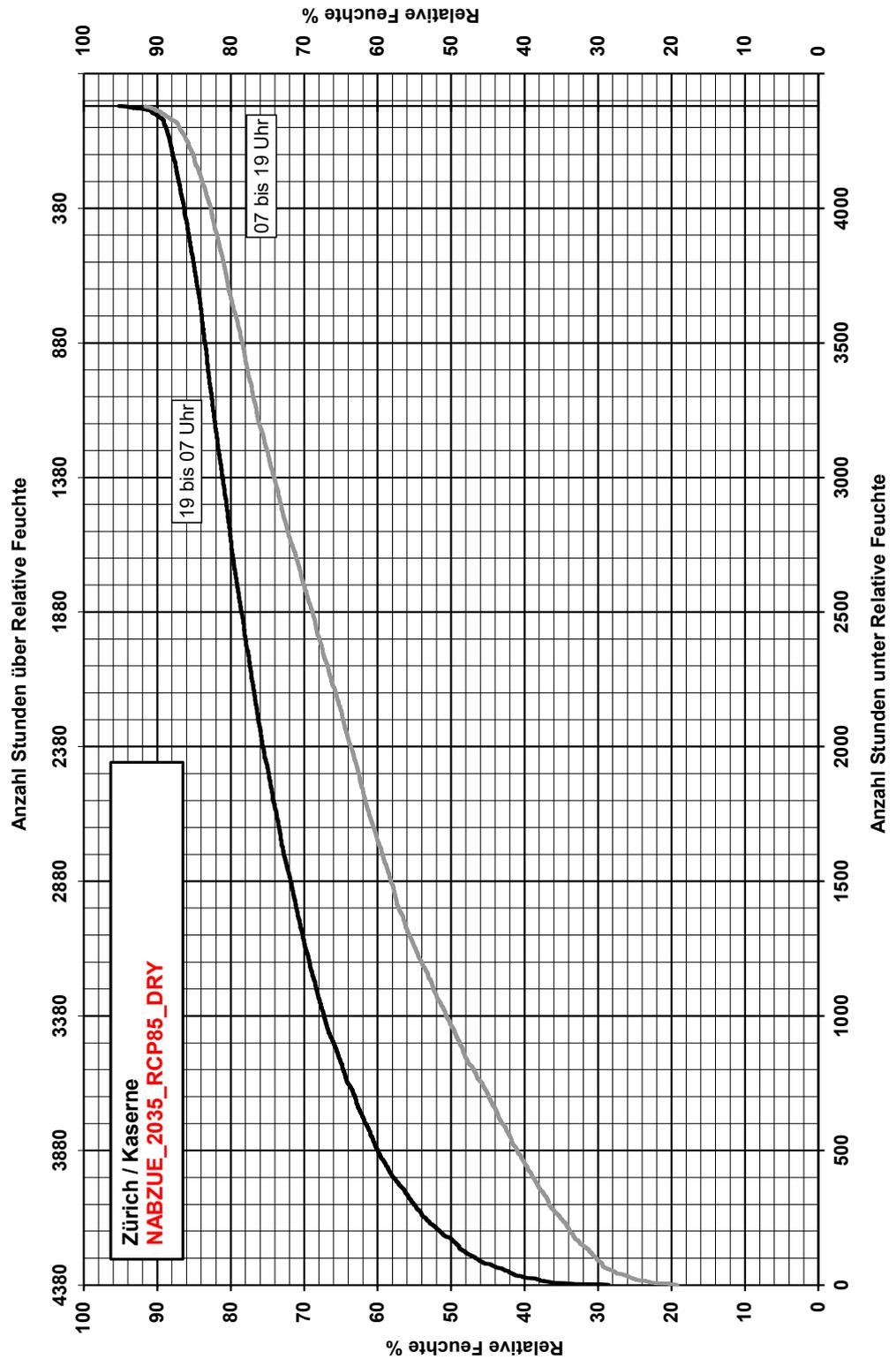


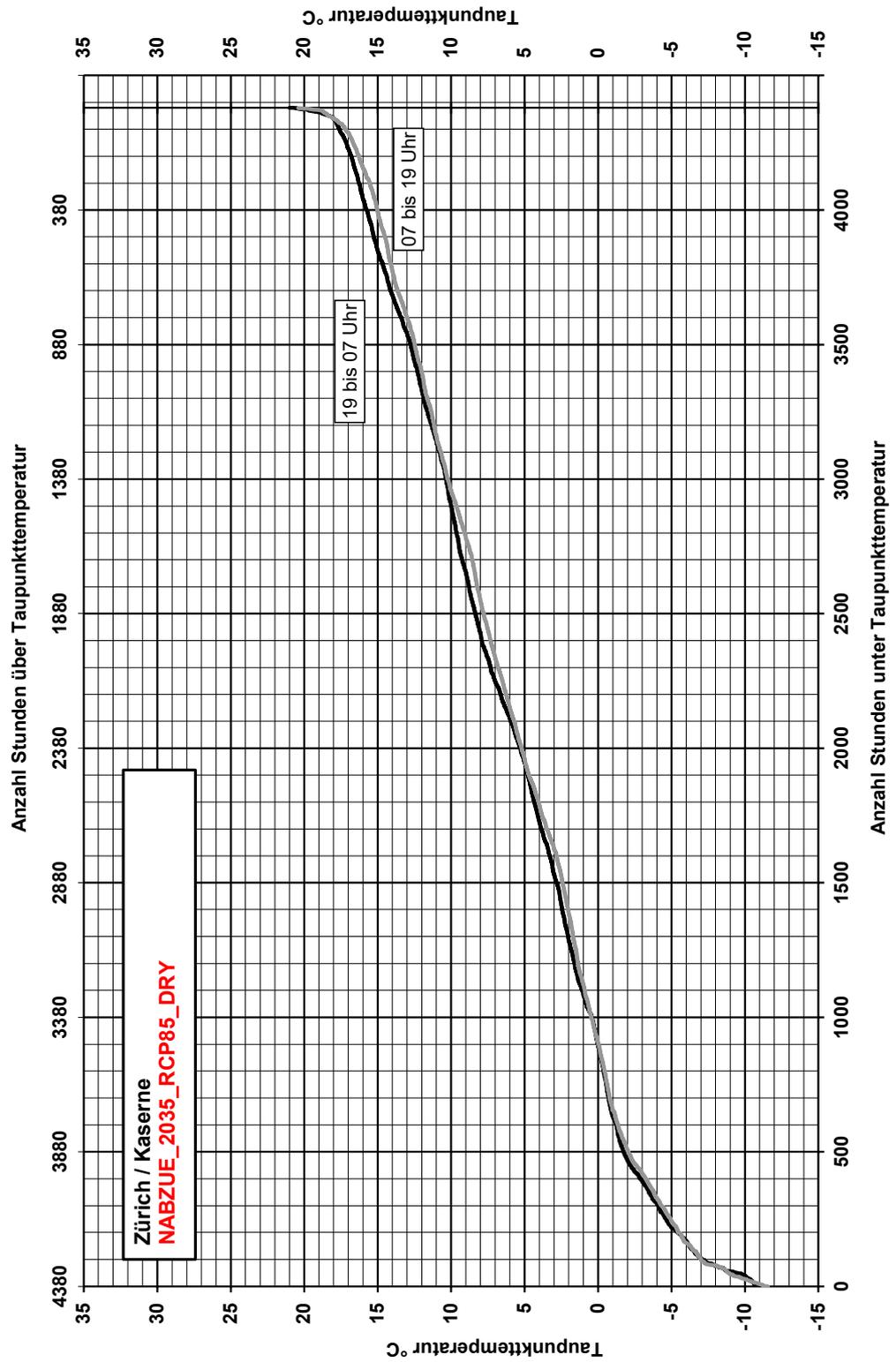


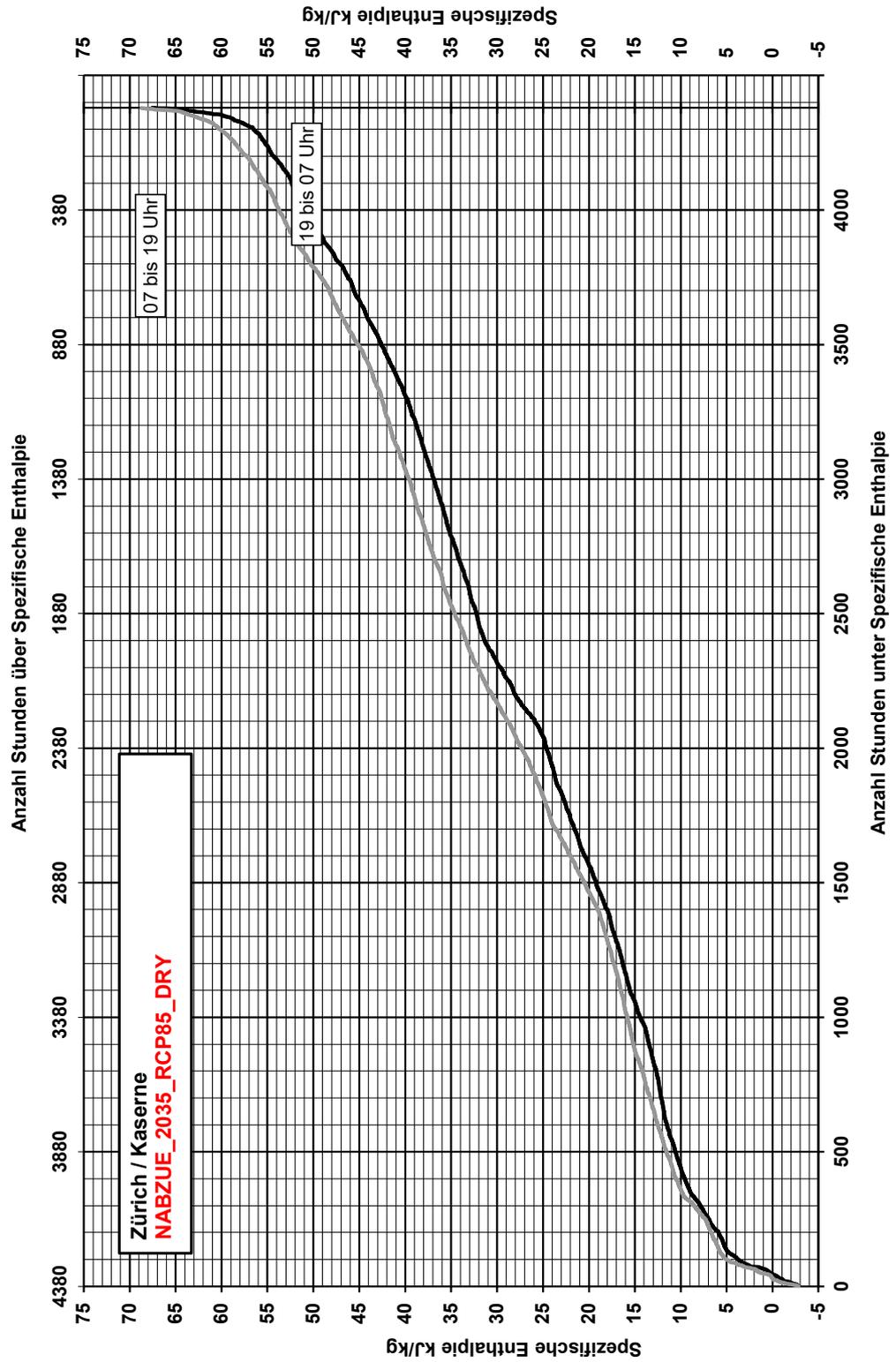


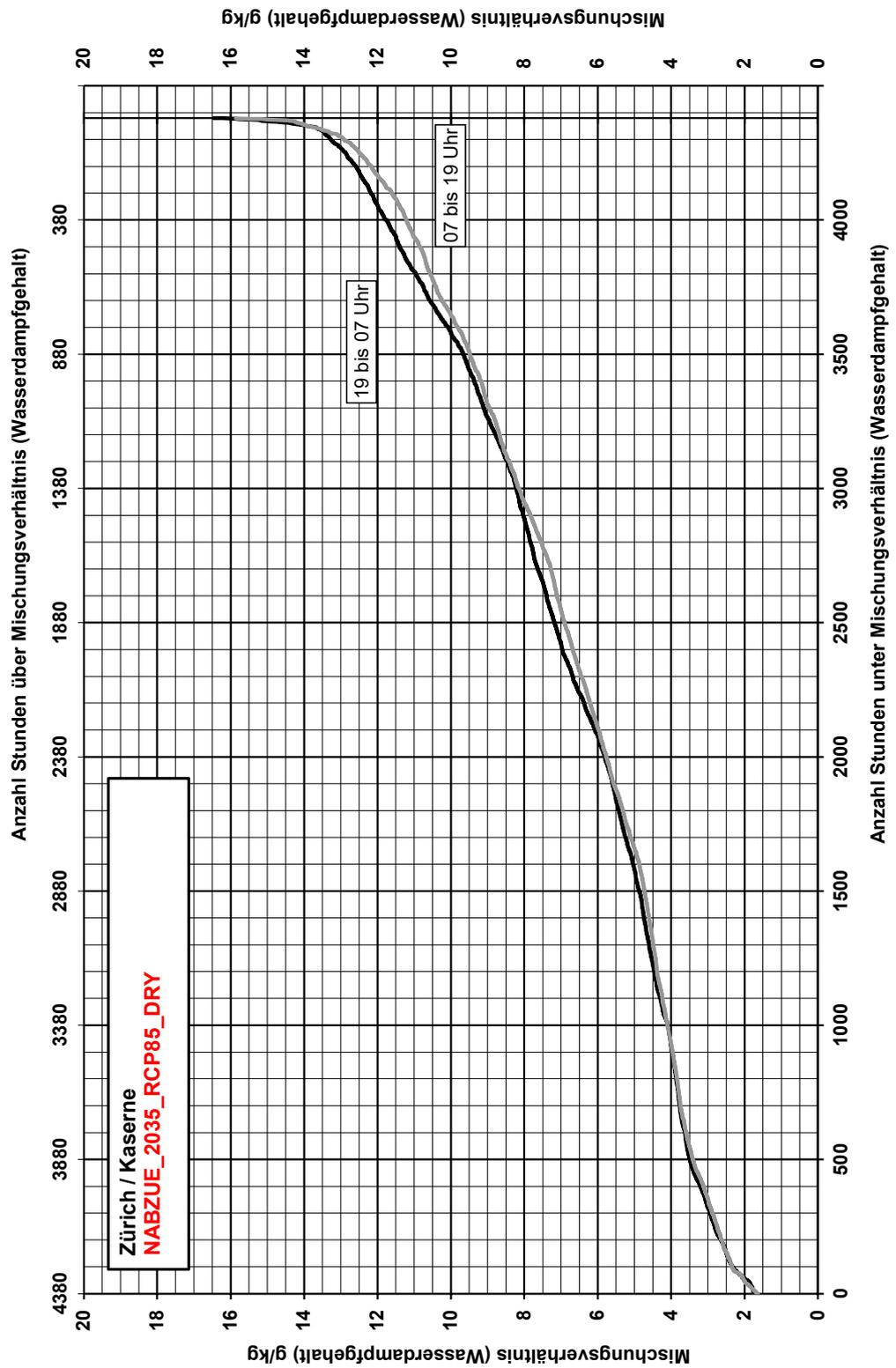
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2035 RCP85 DRY

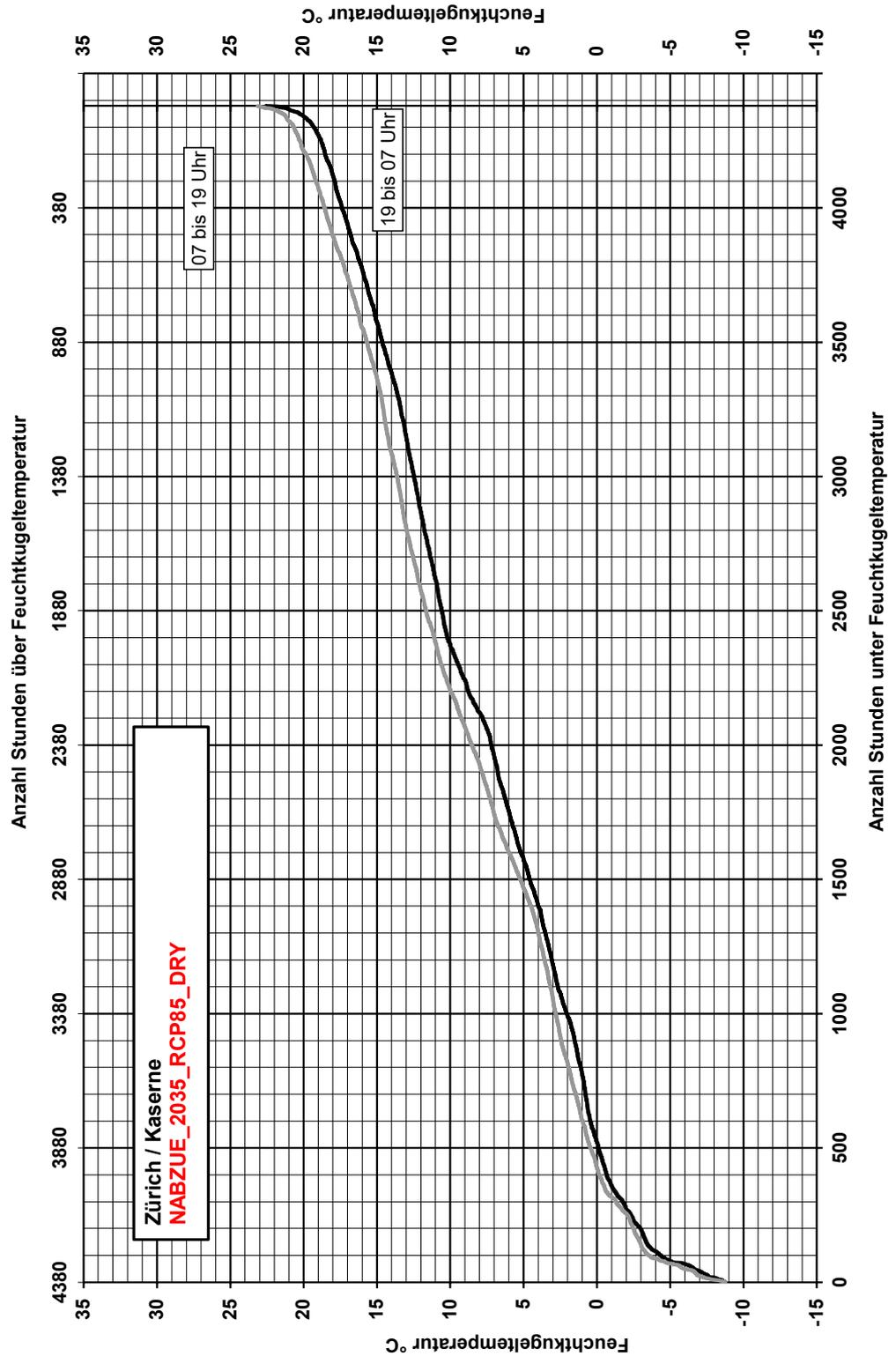




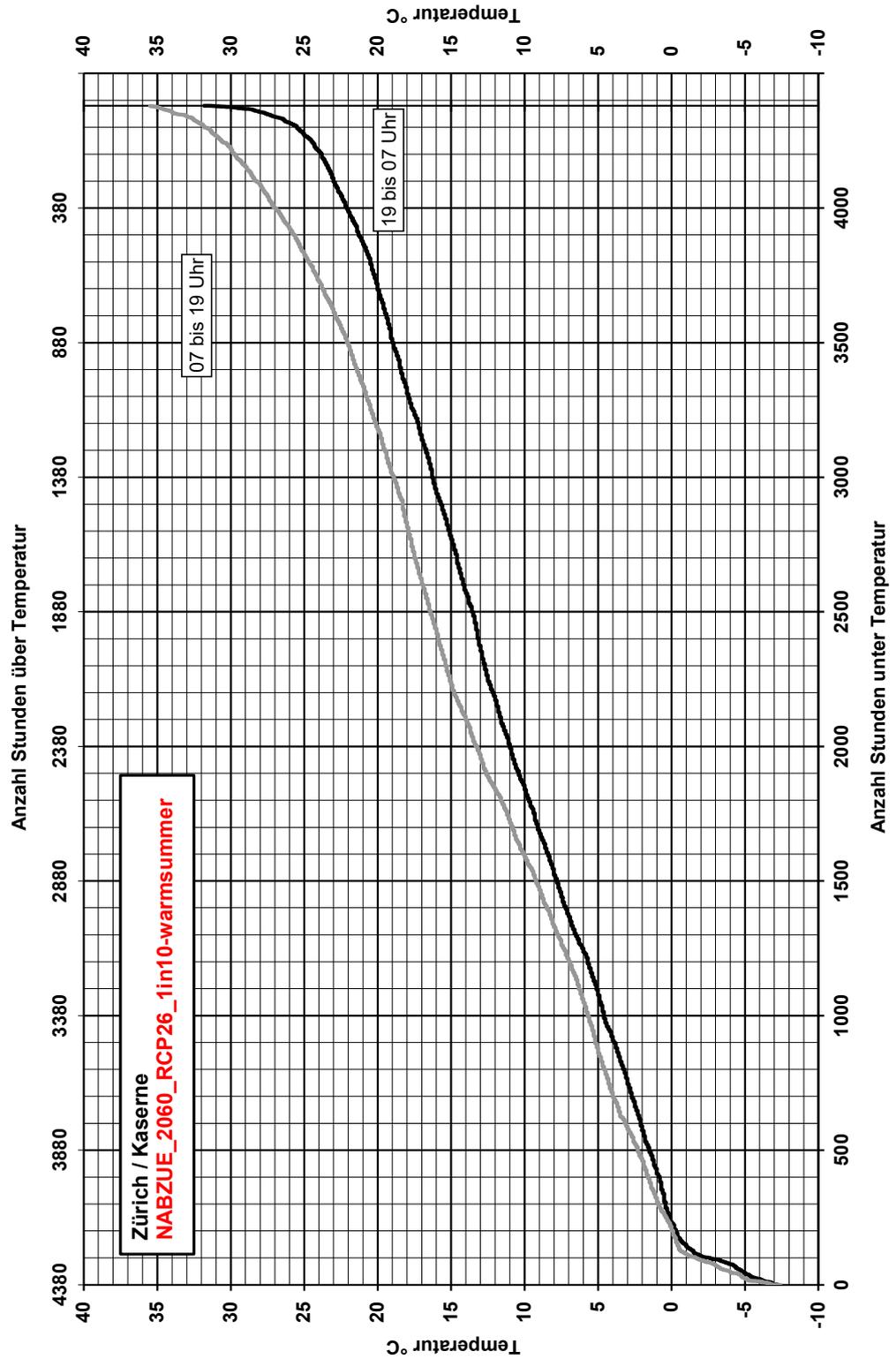


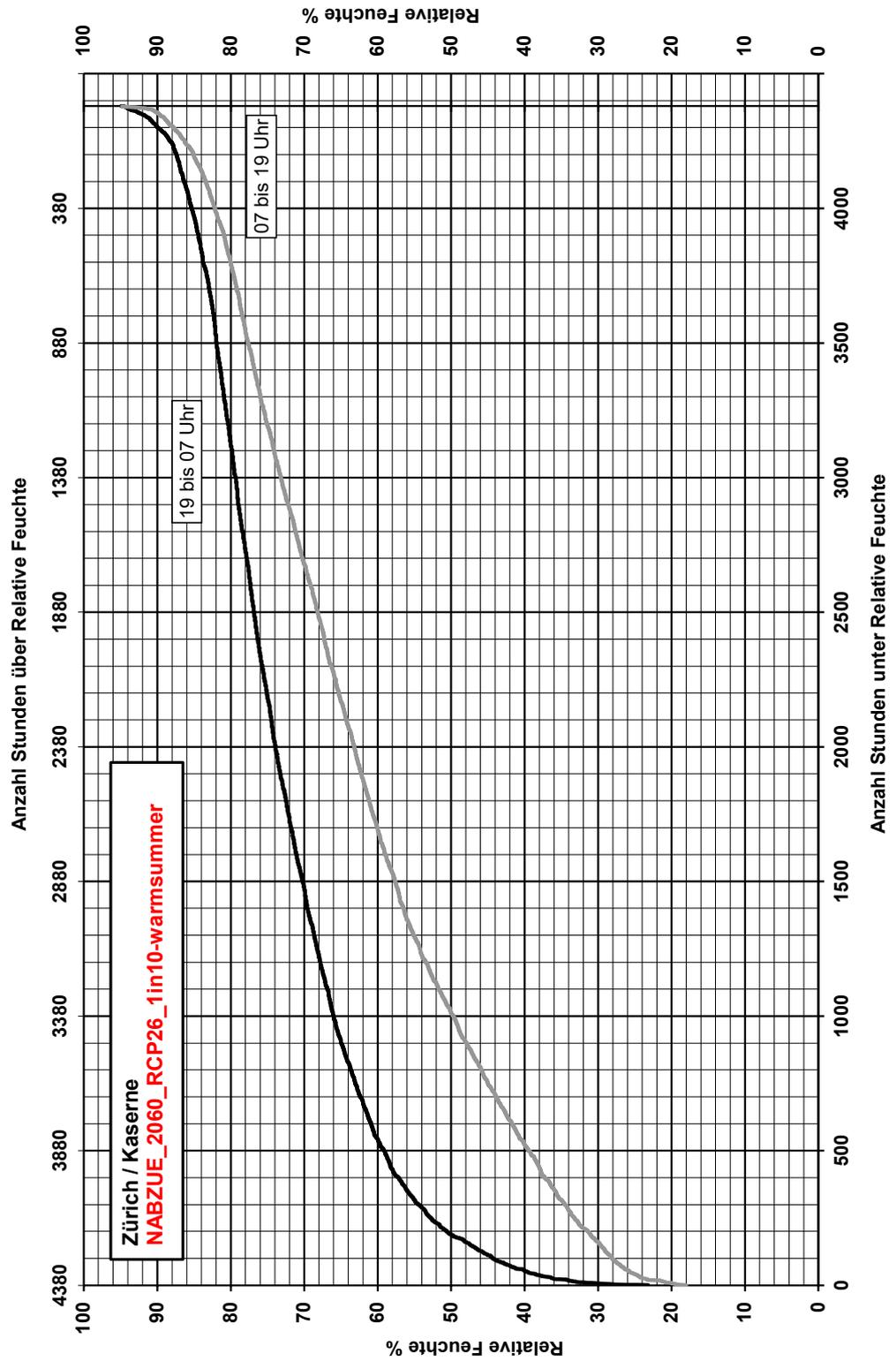


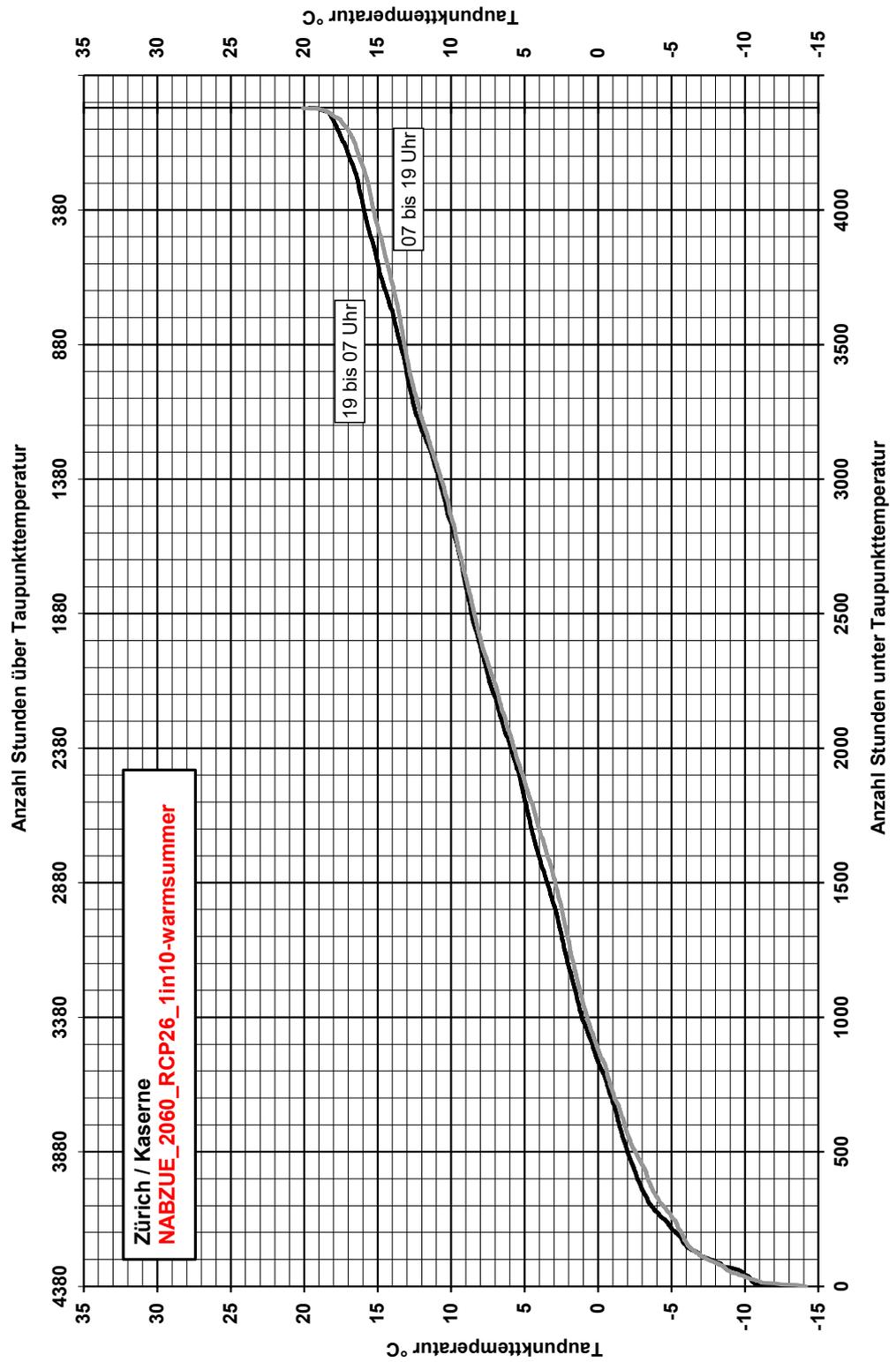


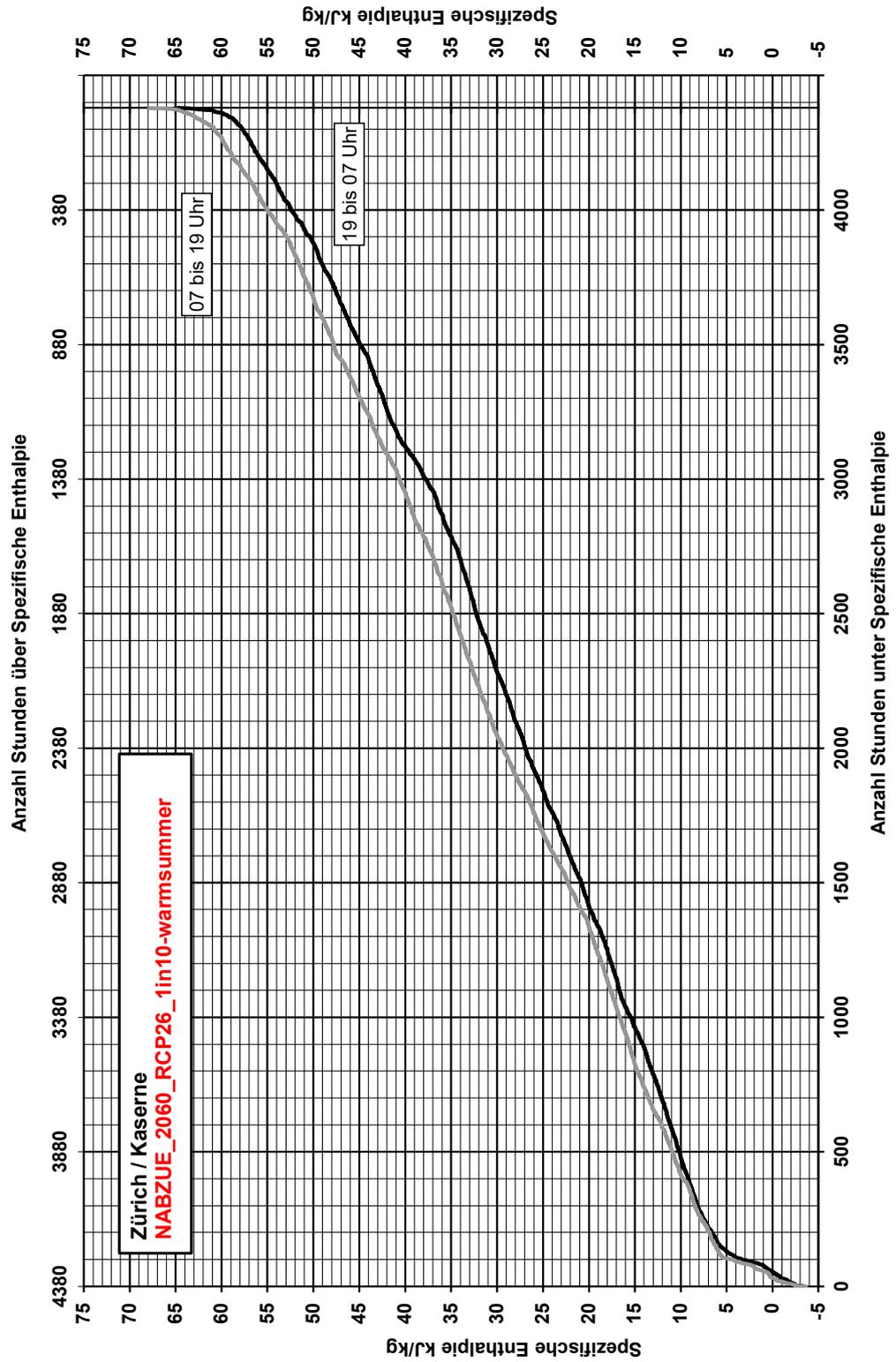


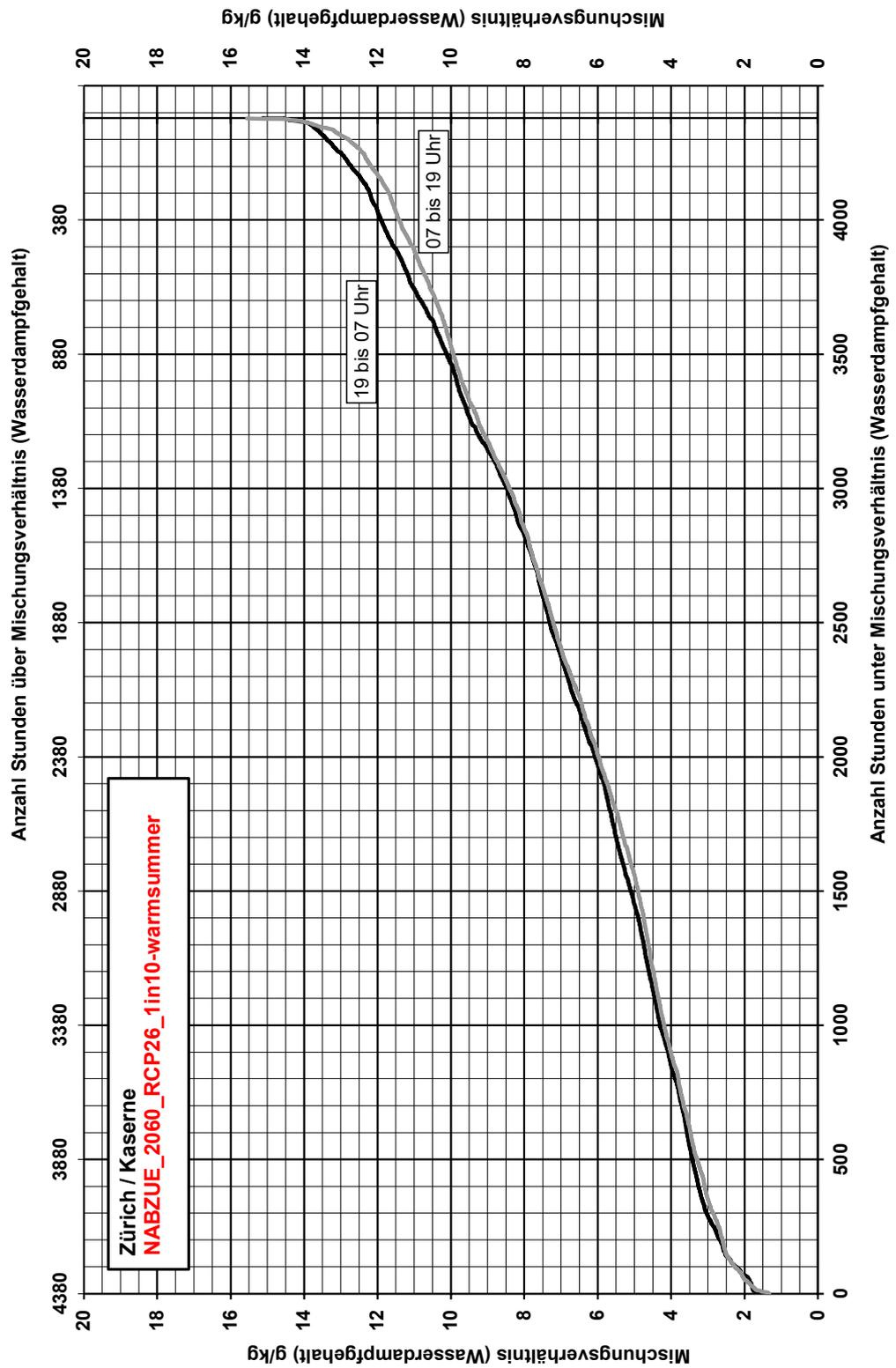
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP26 1in10-warmsummer

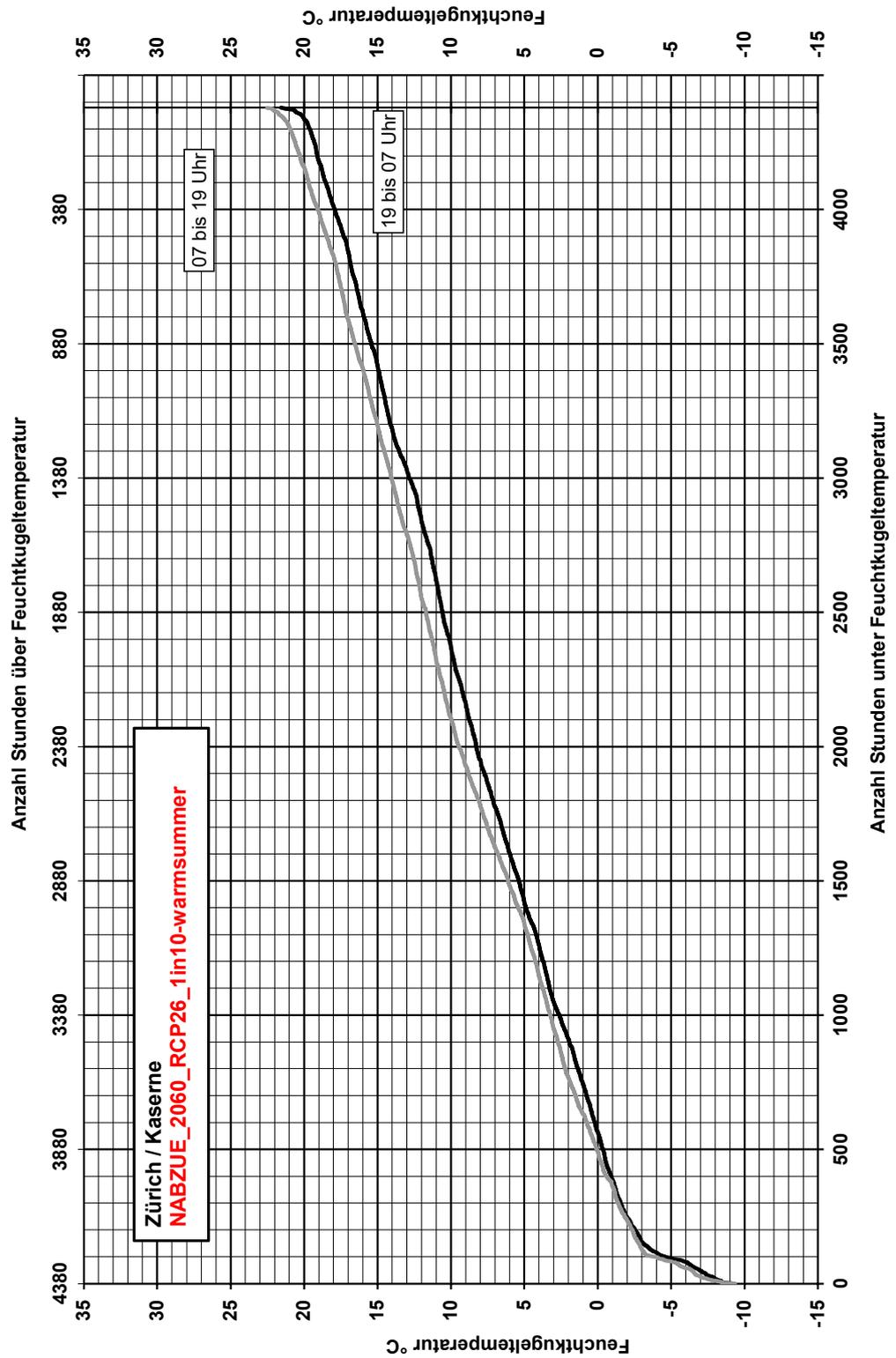




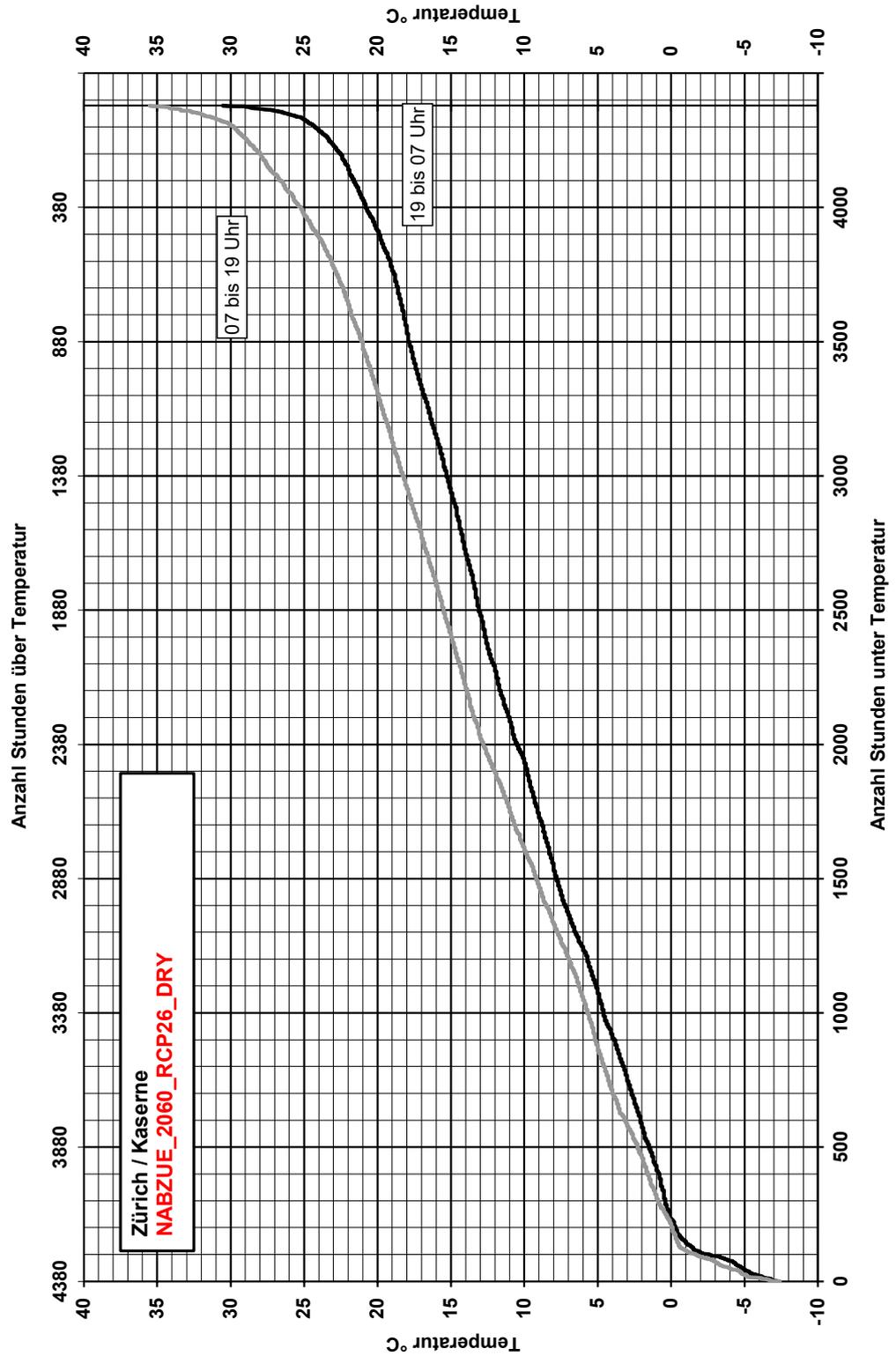


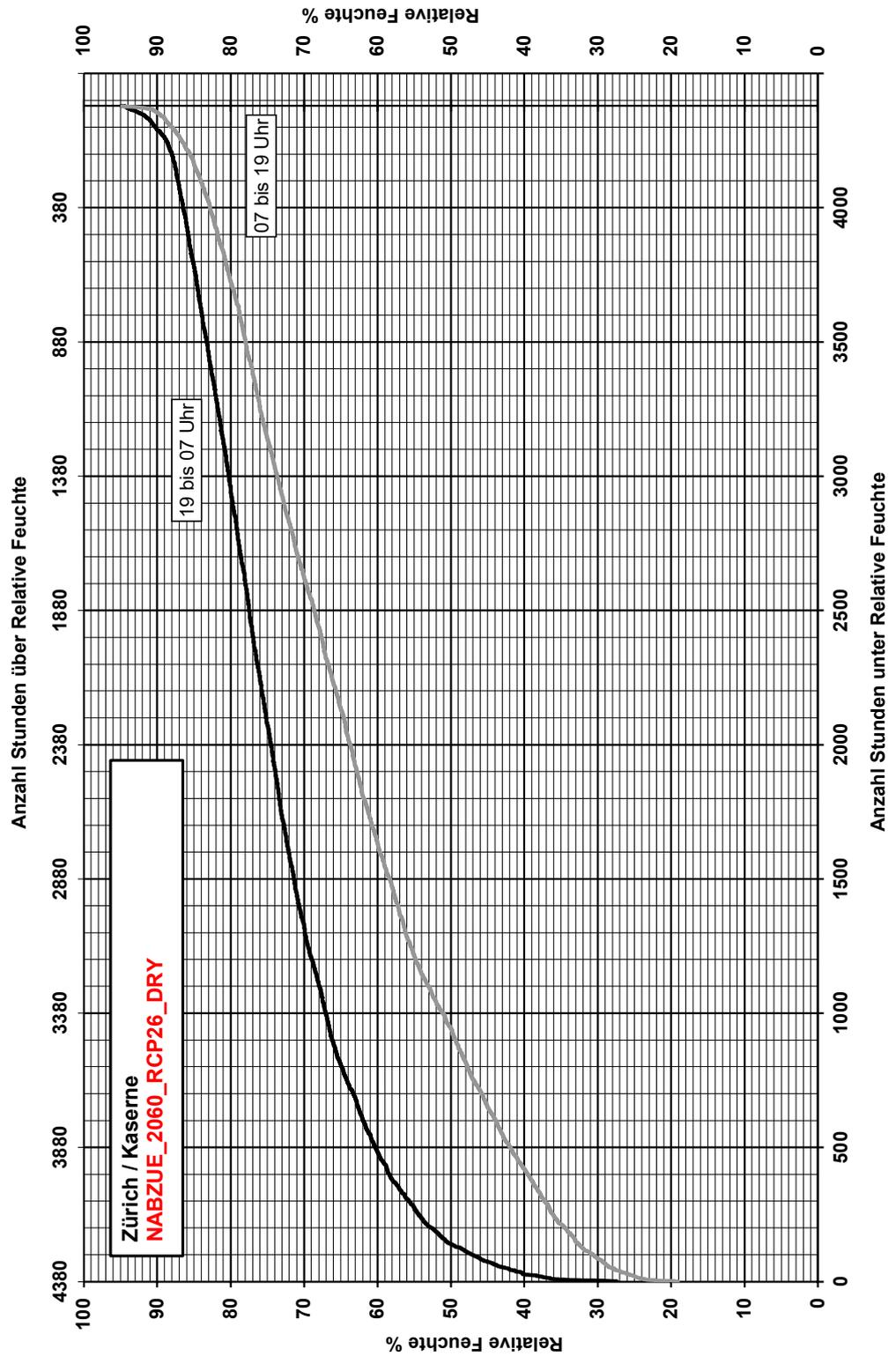


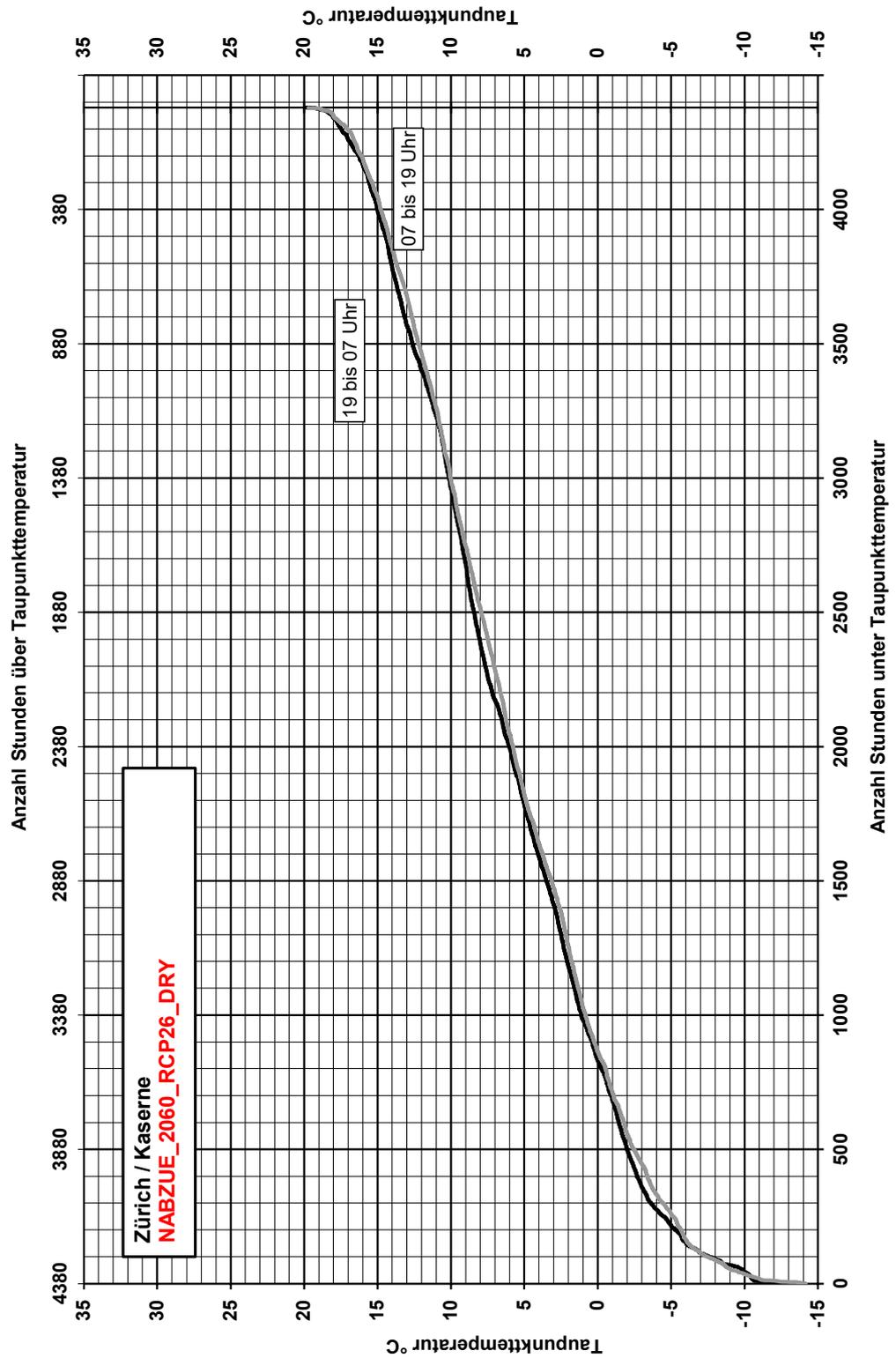


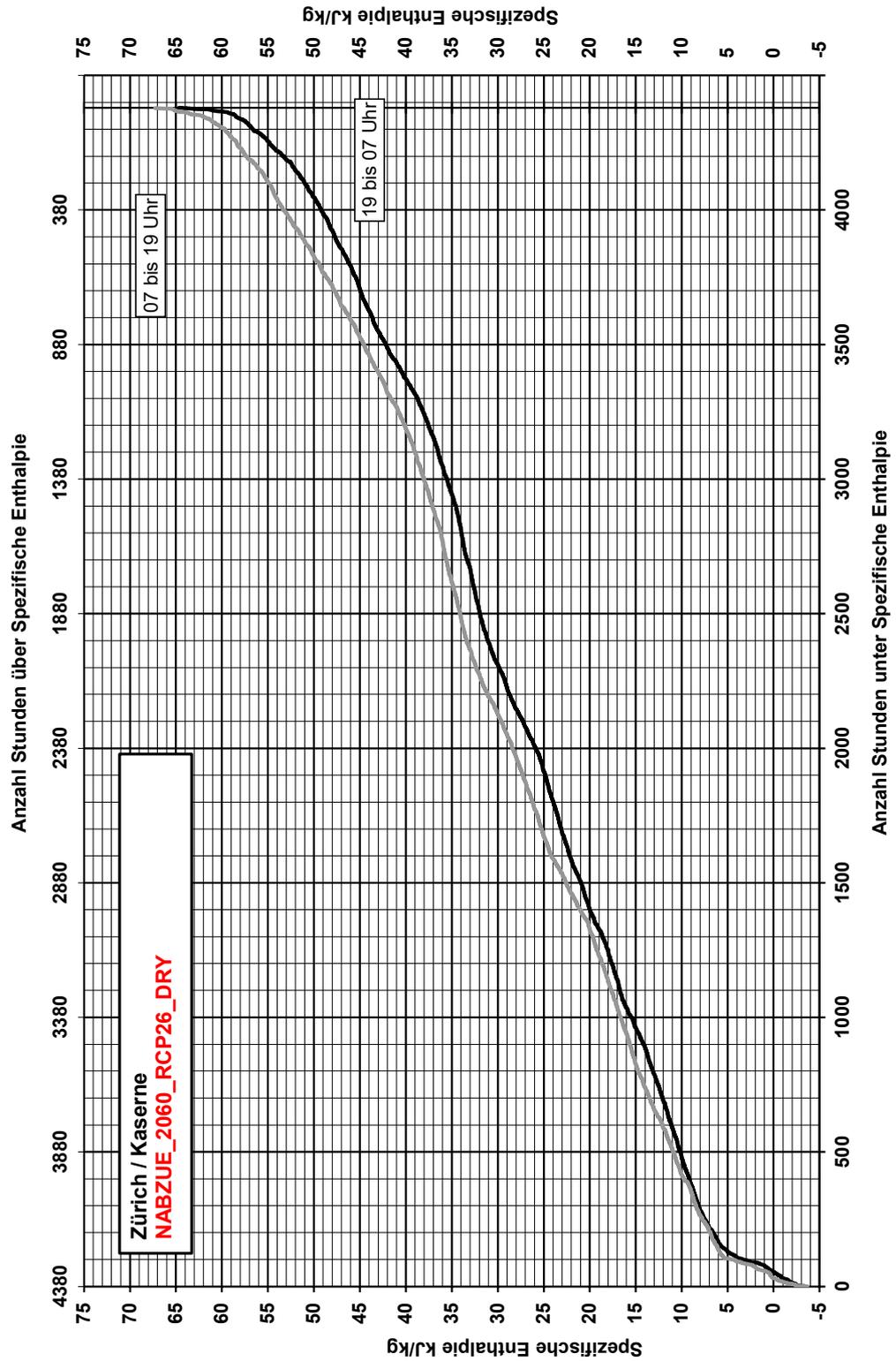


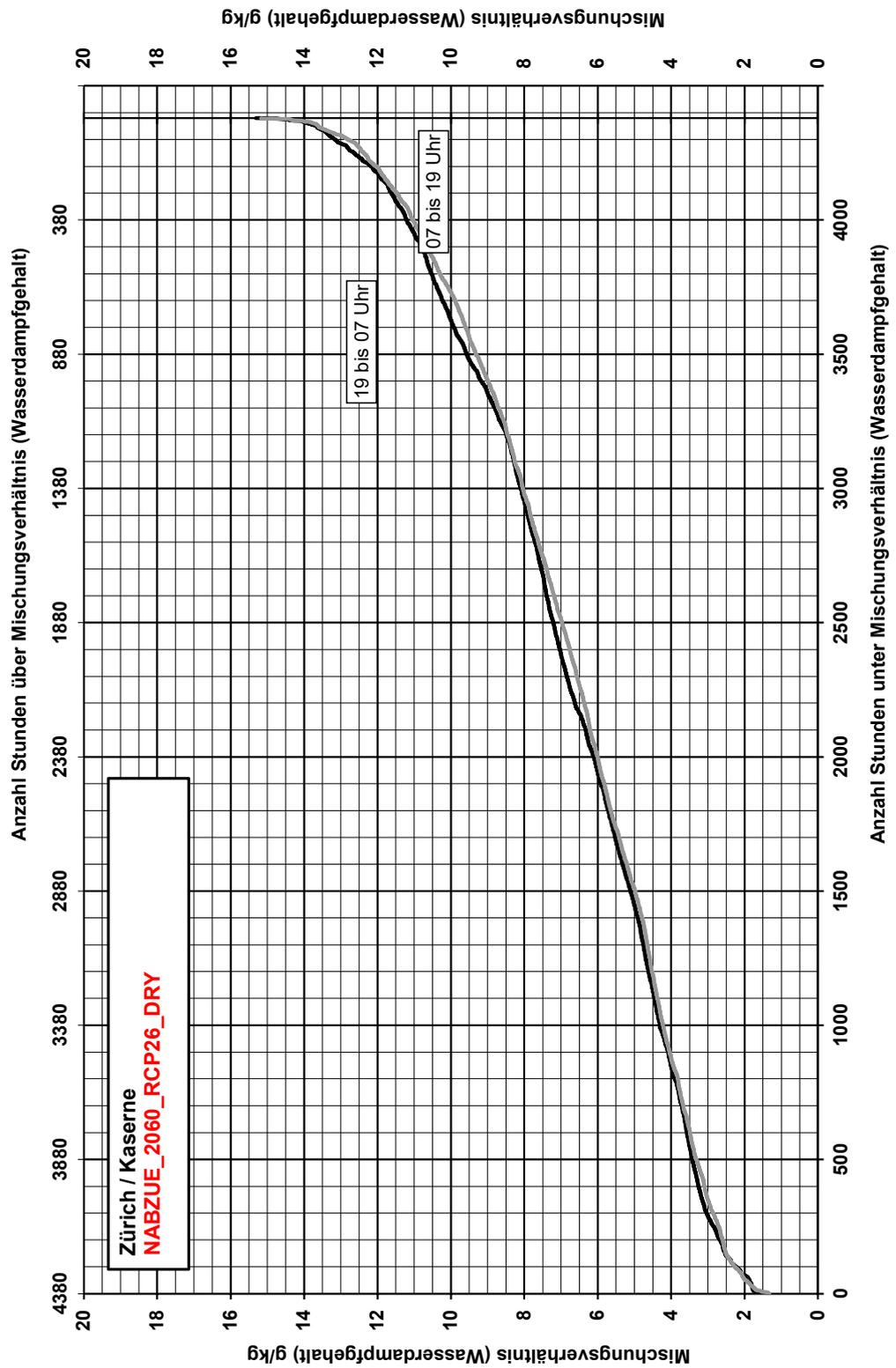
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP26 DRY

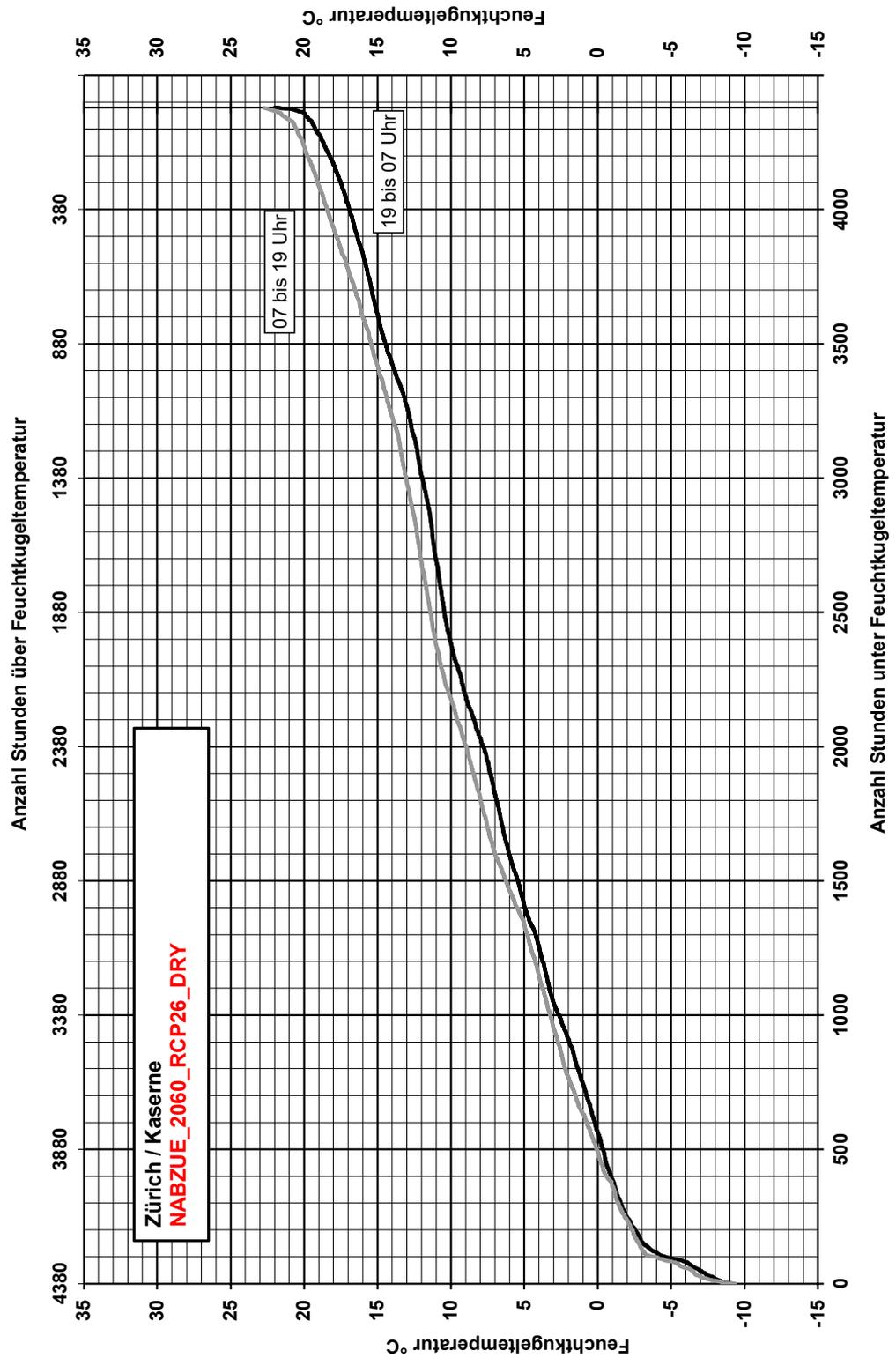




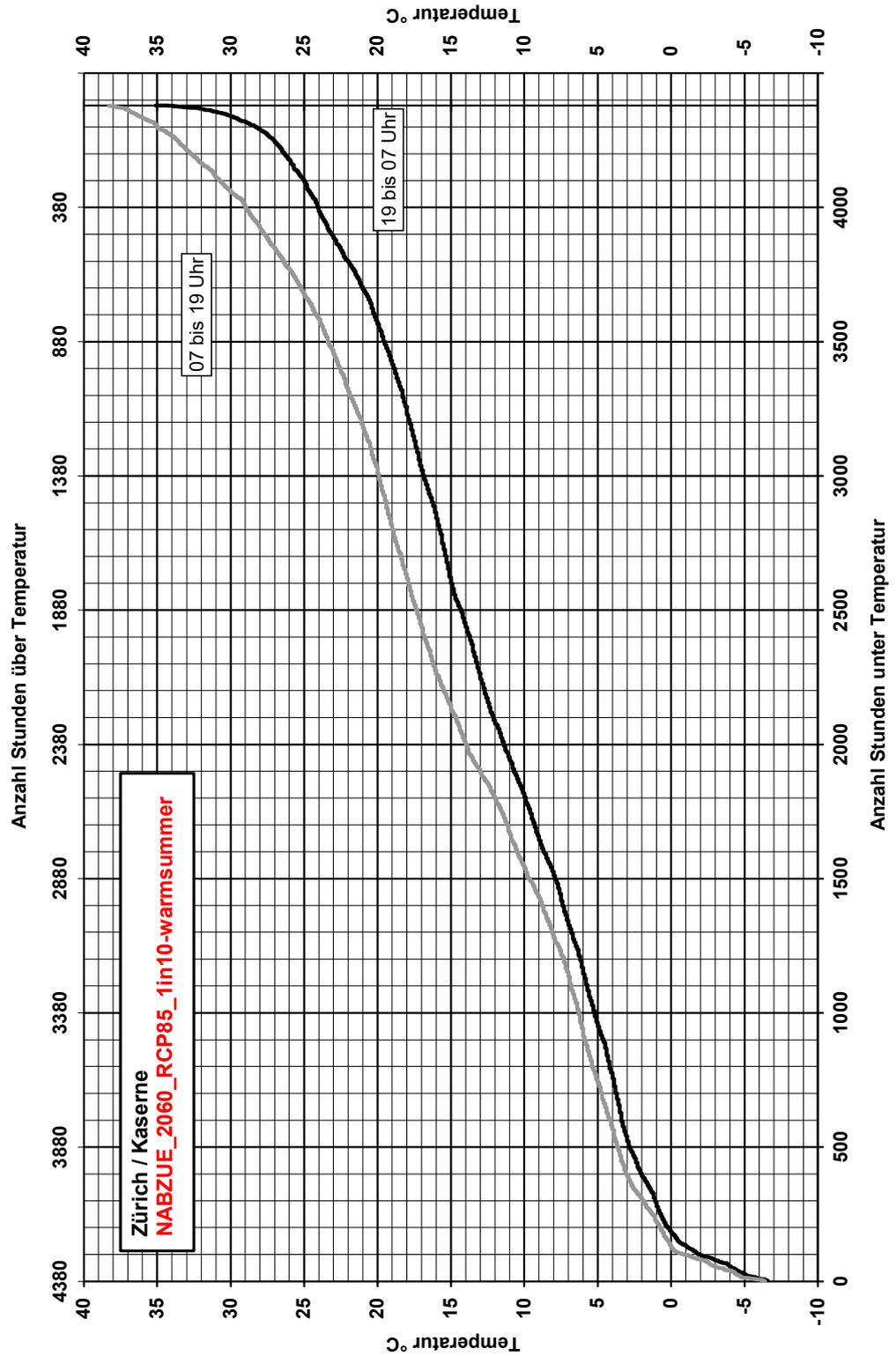


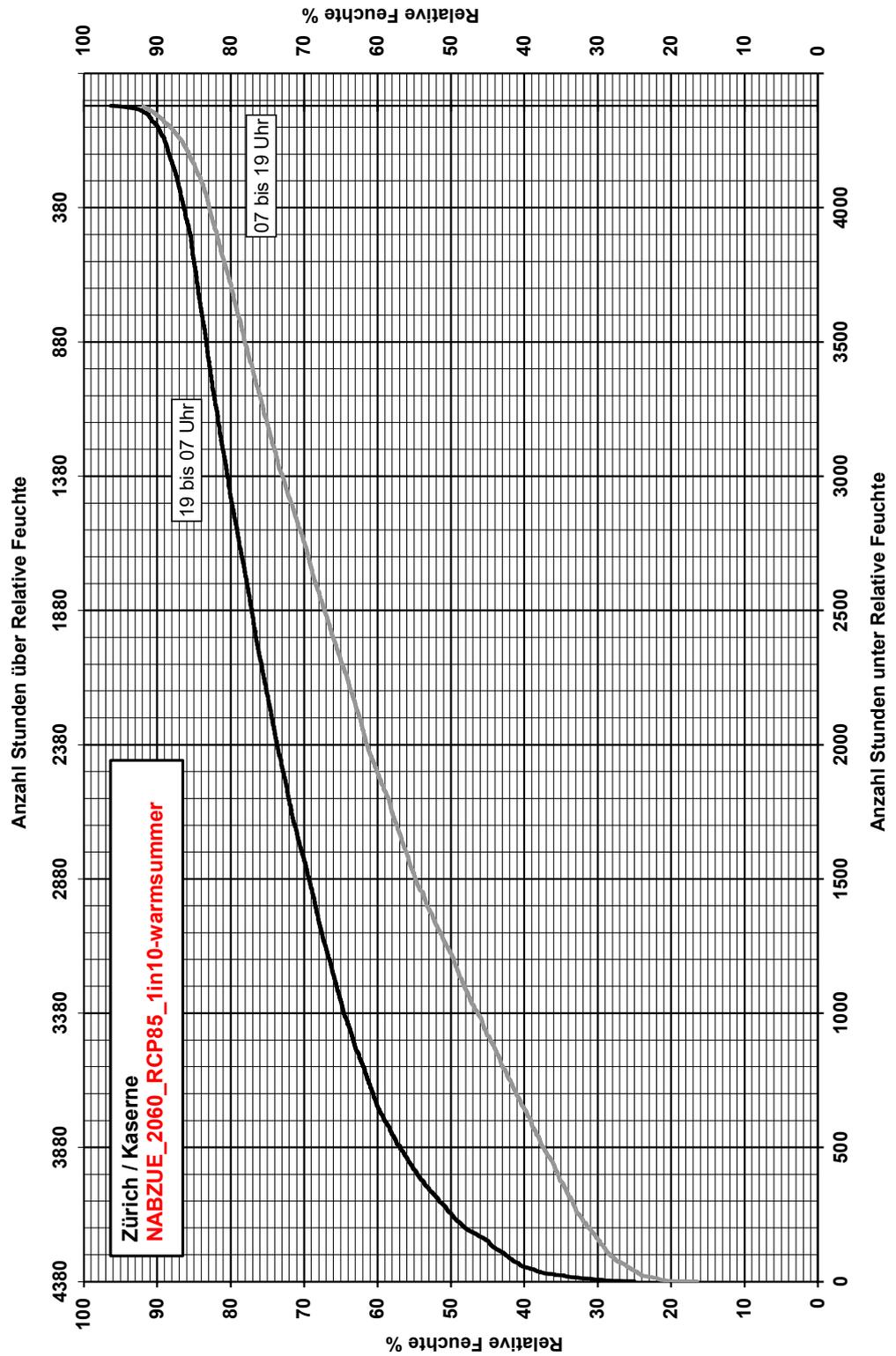


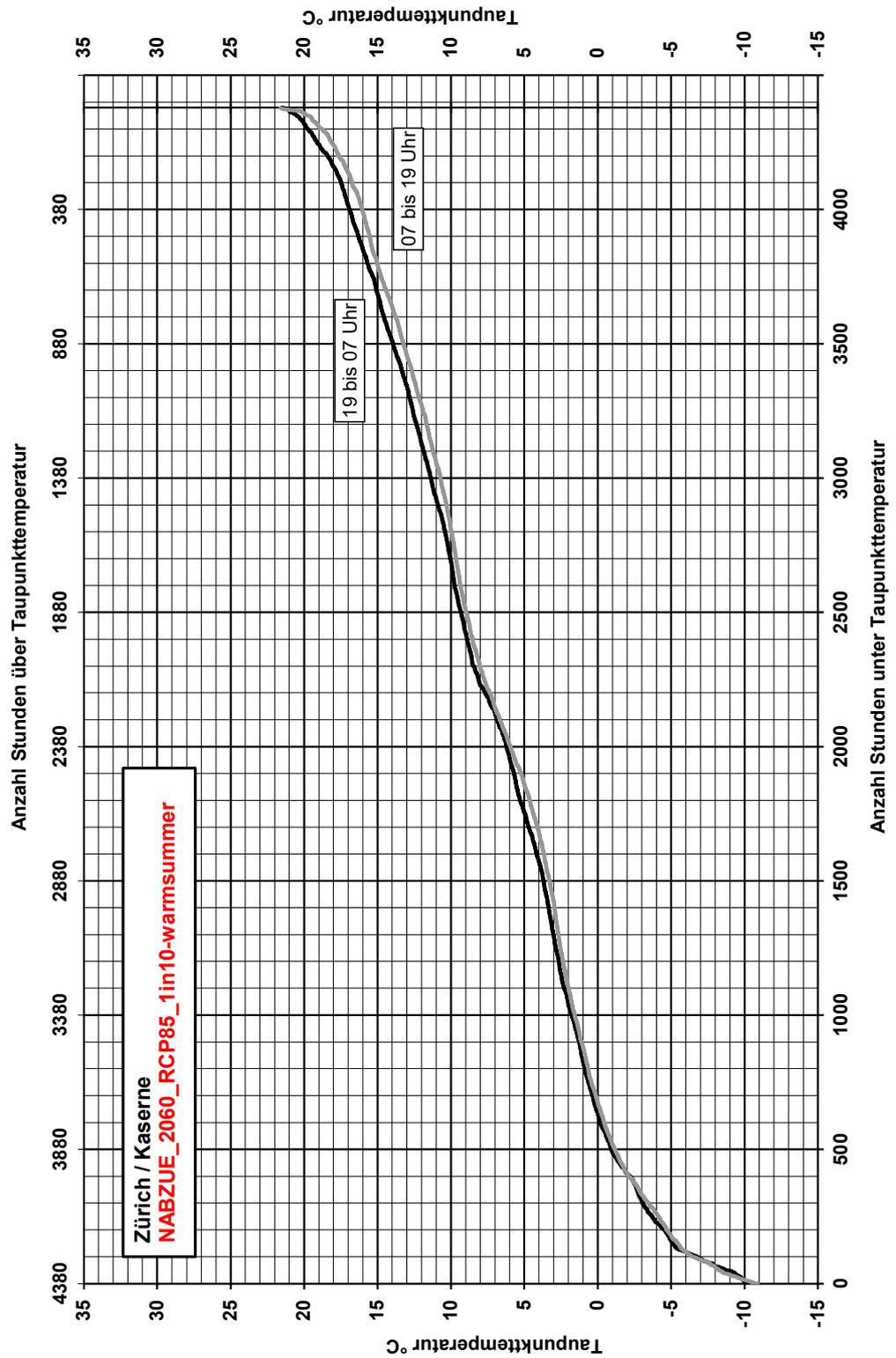


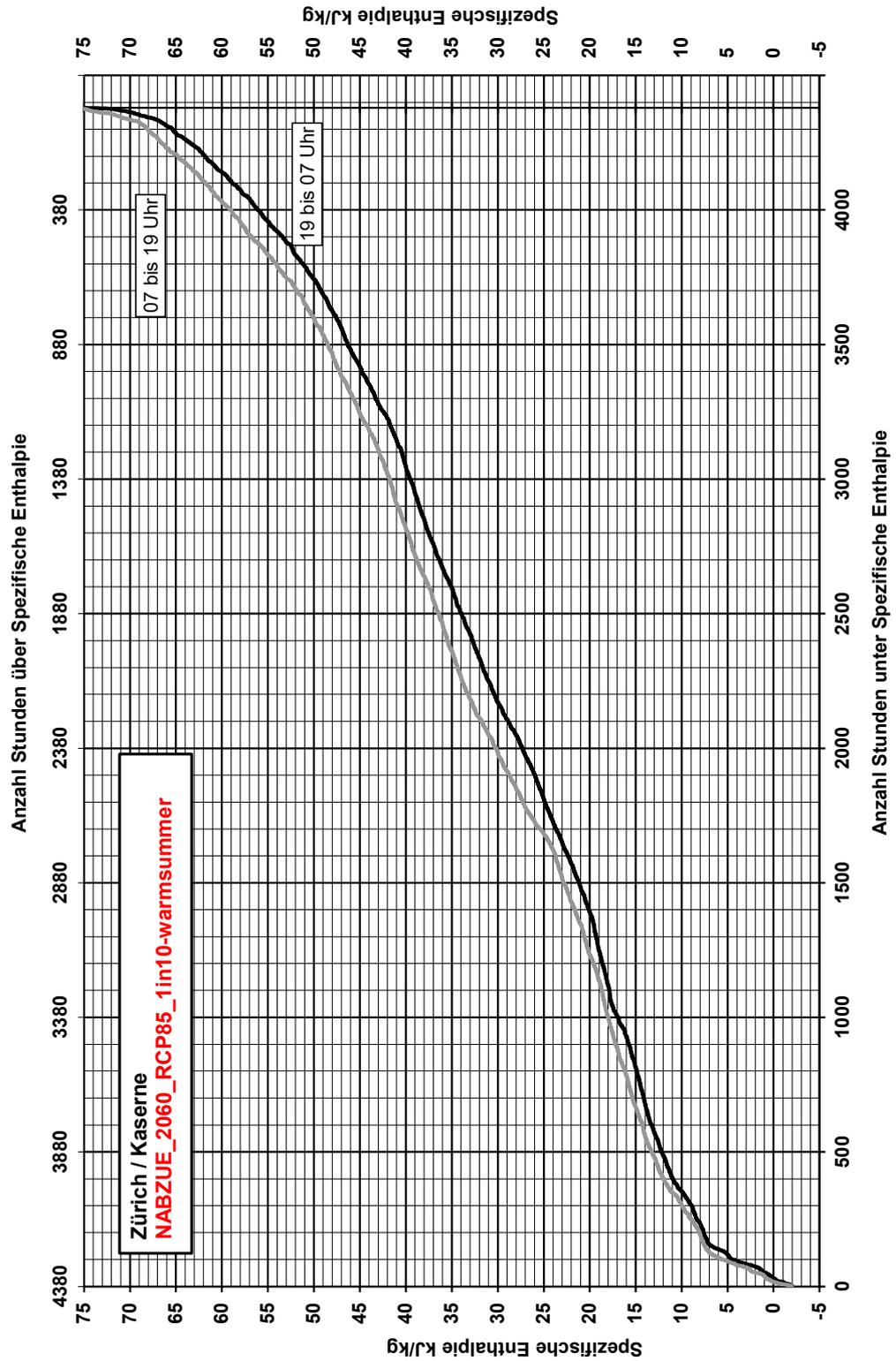


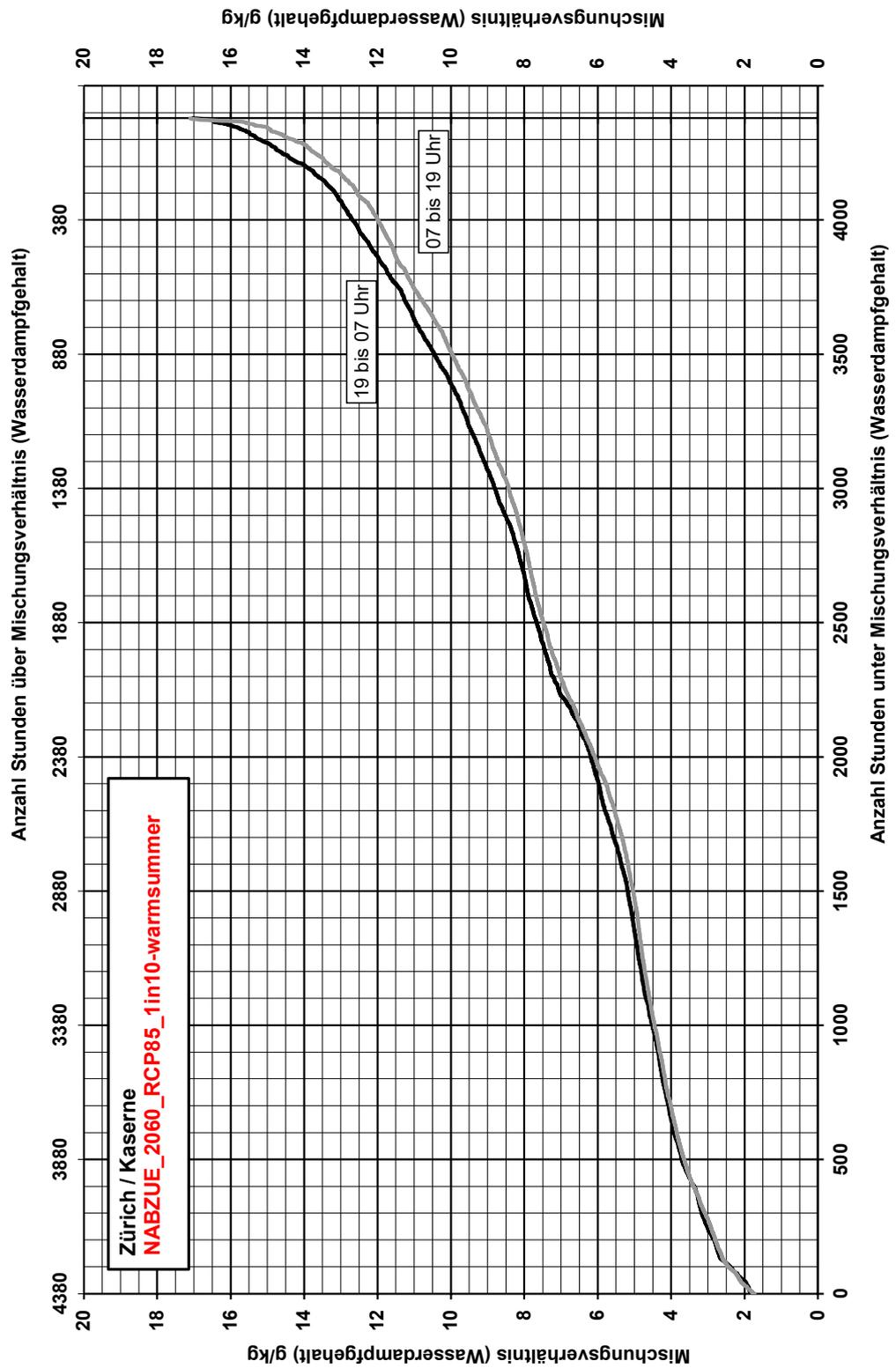
Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP85 1in10warsummer

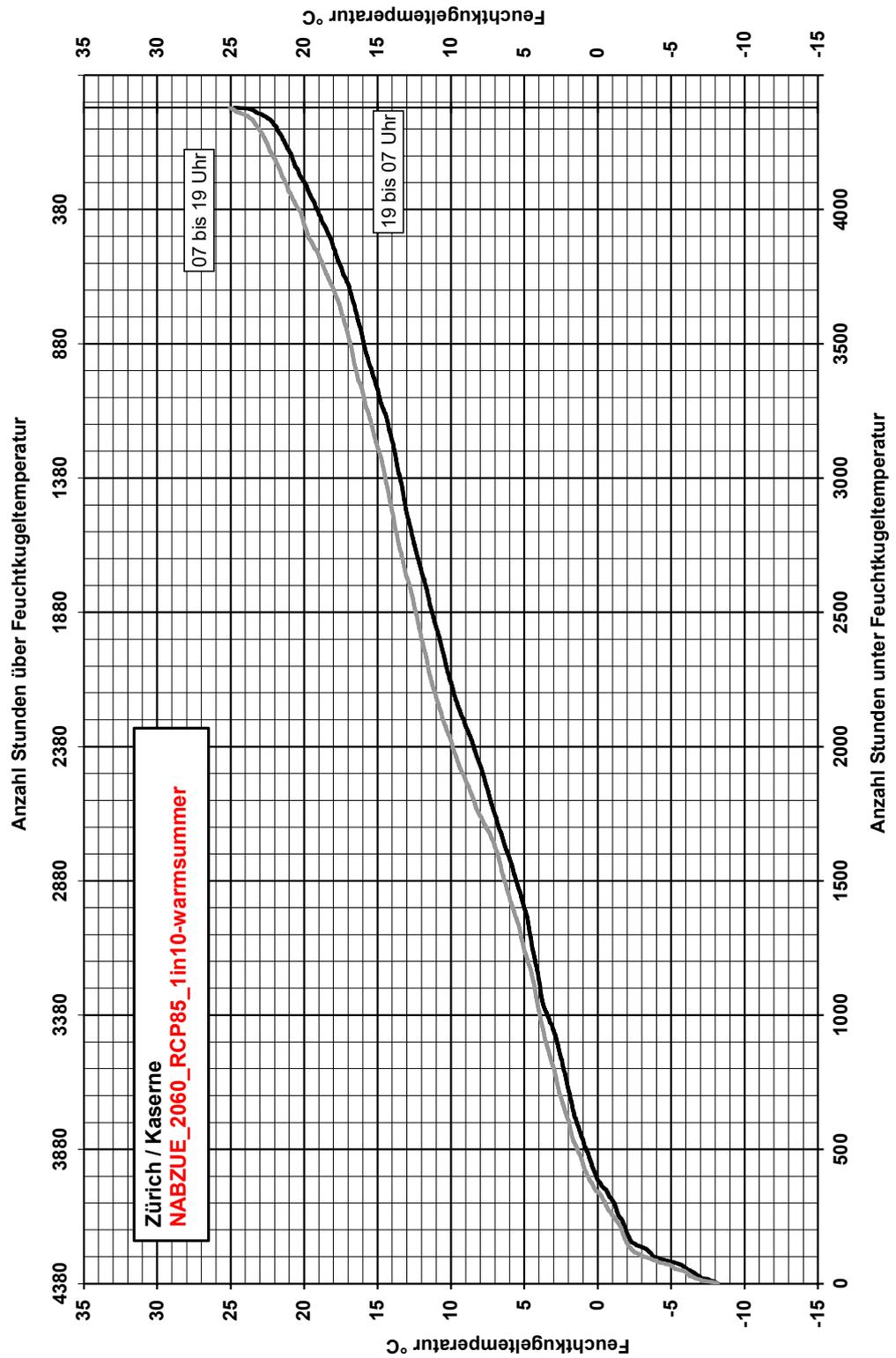












Zürich / Kaserne (NABZUE) 2060 RCP85 DRY

