

Das Rätsel der Eiszeiten, Teil 9, Global Circulation Models III

geschrieben von Lüdecke, Frey | 7. Juli 2014

scienceofdoom

In Teil VII haben wir auf einige frühe GCMs und deren Ergebnisse geschaut, in Teil VIII waren dann die GCMs aus dem ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts dran – atmosphärische GCMs, die die Wassertemperatur der Ozeane einbezogen sowie einige Modelle mittlerer Komplexität. Alle diese Studien versuchten, die fundamentale Grundlage des Einsetzens einer Eiszeit zu untersuchen – immer währende Schneebedeckung in hohen Breiten. Eine permanente Schneebedeckung kann zu permanenten Eisschilden führen – muss es aber nicht. Erforderlich ist also ein Eisschild-Modell, das das komplexe Zusammenspiel von Wachstum, Zerbrechen, Gleiten und Wärmetransport der Eisschilde simuliert.

Angesichts der begrenzten Rechenmöglichkeiten der Modelle war schon die Konstruktion eines Modells, dass die Grundlagen permanenter Schneebedeckung simulieren kann (oder nicht), keine triviale Angelegenheit, aber ein komplettes Ozean-Atmosphäre-GCM mit einem Eisschild-Modell, das 130.000 Jahre abdeckt, war überhaupt nicht möglich. In diesem Beitrag schauen wir auf eine Studie aus jüngster Zeit, in der vollständig gekoppelte GCMs verwendet worden sind. ‚Vollständig gekoppelt‘ bedeutet, dass ein atmosphärisches und ein ozeanisches Modell als Tandem agieren – wobei Wärme, Feuchtigkeit und Impulse übertragen werden.

Smith & Gregory (2012)

Das Problem:

Es ist allgemein akzeptiert, dass das Timing von Eiszeiten auf Variationen der Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist, die aus dem Orbit der Erde um die Sonne resultieren (Hays et al. 1976, Huybers und Wunsch 2005). Diese

solaren Strahlungs-Anomalien müssen durch Rückkopplungs-Prozesse innerhalb des Klimasystems verstärkt werden, einschließlich der Änderungen der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen (Archer et al. 2000) sowie des Wachstums von Eisschilden (Clark et al. 1999). Während es Hypothesen zu den Details dieser Rückkopplungen im Überfluss gibt, ist keine davon ohne Kritiker, und wir können noch nicht behaupten zu wissen, wie das System Erde das Klima erzeugte, das wir in zahlreichen Proxys wiederfinden. Das ist von mehr als nur akademischem Interesse: ein volles Verständnis des Kohlenstoffzyklus' während eines Eiszeitzyklus' oder Details darüber, wie sich der Meeresspiegel im Zuge des Wachsens und Schrumpfens von Eisschilden lokal verändert, wären sehr nützlich bei der genauen Vorhersage zukünftiger Auswirkungen

der anthropogenen CO₂-Emissionen auf das Klima, können wir doch erwarten, dass viele der gleichen fundamentalen Rückkopplungen in beiden Szenarios stattfinden. Der Jahrtausende lange Zeitskala bei der Modellierung auch nur eines einzigen Eiszeitzyklus' ist eine enorme Herausforderung für umfassende Modelle des Erdsystems, die auf gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen beruhen (AOGCMs). Wegen der begrenzten Rechenkapazität sind AOGCMs normalerweise auf Läufe über höchstens ein paar hundert Jahre limitiert, und deren Verwendung in paläoklimatischen Studien war allgemein kurz, sozusagen ein „Schnappschuss“ aus einem speziell interessierenden Zeitabschnitt. Kurzzeitige Simulationen glazialer Zyklen wurden bislang nur mit Modellen durchgeführt, bei denen

wichtige Klimaprozesse wie Wolken oder Feuchtetransporte in der Atmosphäre nur sehr grob parametrisiert sind oder ganz außen vor gelassen wurden. Die starken Beschränkungen hinsichtlich der Rückkopplungen in solchen Modellen zeigen auch dem, was wir über die Entwicklung des Klimas daraus lernen können, Grenzen auf, vor allem in paläoklimatischen Zuständen, die sich signifikant von den besser verstandenen heutigen Zuständen unterscheiden, die die Modelle eigentlich reproduzieren sollen. Die Simulation vergangener Klimazustände in den AOGCMs und der Vergleich derselben mit auf Proxys beruhenden Klimarekonstruktionen erlauben es ebenfalls, die Sensitivität der Modelle bzgl. Klima-Antrieben zu testen, um Vertrauen in deren Vorhersagen des zukünftigen Klimas zu gewinnen.

Ihr Modell:

Für diese Simulationen haben wir den FAMOUS benutzt (=Fast Met. Office and UK universities Simulator), eine niedrig aufgelöste Version des Hadley Centre Coupled Model (HadCM3) AOGCM. Die räumliche Auflösung im FAMOUS ist etwa halb so groß wie im HadCM3, was die Rechenkosten des Modells um einen Faktor 10 reduziert.

Ihr Plan:

Wir präsentieren hier die ersten kurzzeitigen Simulationen über den gesamten letzten Eiszeitzyklus. Wir haben den Rechenaufwand dieser Simulationen durch die Verwendung von FAMOUS reduziert. FAMOUS ist ein AOGCM mit einer relativ kleinen räumlichen Auflösung, und wir haben die Randbedingungen um einen Faktor 10 verändert, so dass 120.000 Jahre zu 12.000 Jahren werden. Wir untersuchen, wie die Einflüsse

orbitaler Variationen der Sonneneinstrahlung, Treibhausgase und Eisschilde der Nordhemisphäre zusammenspielen, um die Evolution des Klimas zu beeinflussen.

Es gibt bei diesem Beschleunigungsprozess aber ein Problem. Die Ozeane reagieren in ganz anderen Zeitmaßstäben auf Änderungen in der Atmosphäre. Einige ozeanische Prozesse dauern Tausende Jahre. Ob also die Verkürzung des Zeitraumes reale Klimabedingungen erzeugen kann, bleibt fraglich.

Ihr Vorgehen:

Ziel dieser Studie ist es, das physische Klima von Atmosphäre und Ozeanen während des letzten Eiszeit-Zyklus' zu untersuchen. Zusammen mit Änderungen der Sonneneinstrahlung infolge Variationen des Erdbits um die Sonne betrachten wir die Eisschilde der Nordhemisphäre und Änderungen der Zusammensetzung von

***Treibhausgasen als externe Antriebs-
Faktoren des Klimasystems, die wir
als Grenzbedingungen spezifizieren,
entweder getrennt oder in
Kombination. Änderungen der
Sonnenaktivität, das Eis in der
Antarktis, die Vegetation,
Meeresströme oder
Schmelzwasserflüsse aus den sich
bildenden Eisschilden sind in diesen
Simulationen nicht enthalten. Unser
experimenteller Aufbau ist daher in
gewisser Weise vereinfacht, wobei
bestimmte potentielle Klima-
Rückkopplungen ausgeschlossen sind.
Obwohl dies teilweise dazu führt,
dass in dieser Version von FAMOUS
bestimmte Prozesse fehlen oder nur
sehr schwach modelliert werden,
erlaubt es uns diese Vereinfachung,
den Einfluss spezifizierter Antriebe
besser zu erkennen, ebenso wie die
Sicherstellung, dass sich die
Simulationen eng an das reale Klima***

anlehnen.

Noch einmal zur Verdeutlichung der Kernpunkte dieser Modellierung:

1. Ein vollständiges GCM wird verwendet, jedoch mit reduzierter räumlicher Auflösung.

2. Die Antriebe werden um einen Faktor 10 beschleunigt im Vergleich zur Realität.

3. Zwei der eingehenden grundlegenden Antriebe sind in Wirklichkeit Rückkopplungen, die man spezifizieren muss, um das Modell zum Laufen zu bringen – das heißt, das Modell kann nicht diese beiden kritischen Rückkopplungen simulieren (CO₂ und Ausdehnung der Eisschilde).

4. Es wurden 5 verschiedene Simulationen durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Faktoren zu erkennen:

a) Nur orbitaler Antrieb (ORB)

b) Nur Antrieb durch Treibhausgase (GHG)

c) Nur Ausdehnung der Eisschilde (ICE)

d) Alle drei zusammen mit 2 unterschiedlichen Eisschild-Rekonstruktionen (ALL-ZH & ALL-5G – man beachte, dass ALL-ZH die gleiche Eisschild-Rekonstruktion aufweist wie ICE, während ALL-5g eine andere hat).

Die modellierten Temperaturergebnisse im Vergleich zu tatsächlichen Temperaturen für die Antarktis und Grönland (Schwarz) sehen so aus:



Abbildung 1: Temperaturunterschiede in vorindustrieller Zeit in der Ostantarktis (oben) und Grönland (unten). Aus Smith & Gregory 2012
Hier gibt es viele interessante Punkte.

Betrachten wir zunächst die Antarktis. Man erkennt, dass orbitale Antriebe allein sowie die

Eisschilde der Nordhemisphäre allein wenig oder gar keinen Einfluss auf die Modellierung der Temperaturen in der Vergangenheit haben. Aber die Treibhausgaskonzentrationen selbst als Antrieb zeigen eine modellierte Temperatur, die etwa ähnlich der letzten 120.000 Jahre ist – unabhängig von Temperaturvariationen mit höherer Frequenz, worauf wir später noch eingehen. Fügen wir die Eisschilde der Nordhemisphäre hinzu, bekommen wir sogar eine noch größere Übereinstimmung. Ich bin überrascht, dass die Eisschilde angesichts der Menge an Sonnenstrahlung, die sie reflektieren, nicht noch größeren Einfluss haben.

Sowohl Treibhausgase als auch Eisschilde kann man in der Wirklichkeit als positive Rückkopplungen betrachten (obwohl sie in diesem Modell spezifiziert sind). Für die Südpol-Region haben

die Treibhausgase einen viel stärkeren Effekt.

Schauen wir auf Grönland, erkennen wir, dass der orbitale Antrieb wieder einmal für sich allein kaum eine Auswirkung zeitigt, während Treibhausgase und Eisschilde allein ähnliche Auswirkungen haben, individuell aber weit entfernt sind vom tatsächlichen Klima. Kombiniert man alle Antriebe sehen wir eine gute Übereinstimmung mit tatsächlichen Temperaturen bei einer Rekonstruktion und eine nicht so gute Übereinstimmung bei einer anderen. Dies impliziert: Bei anderen Modellen, die versuchen, die Dynamik der Eisschilde zu simulieren (anstatt sie zu spezifizieren), kann die Genauigkeit für den Erfolg der Modellierung kritisch sein. Wieder einmal erkennen wir, dass Temperaturvariationen höherer Frequenz überhaupt nicht gut

simuliert werden, und selbst bei Variationen mit geringerer Häufigkeit – zum Beispiel von vor 110.000 bis 85.000 Jahren – fehlt eine ziemliche Menge Variabilität (in dem Modell).

Die Autoren schreiben:

Die EPICA-Daten (Antarktis) zeigen, dass die Temperatur relativ zu ihren jeweiligen längerzeitlichen Trends stärker zurückging als das CO₂ während dieser Zeit (vor 120.000 bis 110.000 Jahre), aber in unseren Experimenten sinken die simulierten Antarktis-Temperaturen gleichlaufend mit CO₂. Dies zeigt, dass in unserem Modell eine wichtige Rückkopplung fehlt, oder dass unser Modell vielleicht über-sensitiv hinsichtlich CO₂ ist und unter-sensitiv hinsichtlich eines der anderen Antriebsfaktoren. Tests des Modells, bei denen die Antriebe nicht künstlich beschleunigt wurden,

schließen die Möglichkeit aus, dass die Beschleunigung ein Faktor ist.

Abrupte Klimaänderung

**Was ist mit den
Temperatursignalen
höherer Frequenz?
Die Grönland-Daten
zeigen eine viel
höhere
Größenordnung als
die Antarktis bei**

**dieser Frequenz,
aber keine von
beiden wird in den
Modellen
reproduziert.**

***Der andere
auffällige
Unterschied
zwischen dem
Modell und der
NGRIP-
Rekonstruktion ist***

***das Fehlen
abrupter
Ereignisse mit
großer Amplitude
im Zeitmaßstab von
Jahrhunderten, die
aus Eisbohrkernen
hervorgehen. Man
glaubt, dass
periodische Fluten
von Schmelzwasser
der***

***nordhemisphärische
n Eisschilde und
die nachfolgende
Störung
ozeanischer
Wärmetransporte in
diese Ereignisse
involviert sind
(Bond et al. 1993,
Blunier et al.
1998), und das
Fehlen von***

Schmelzwasserabflüssen in unserem Modell ist möglicherweise einer der Hauptgründe, warum wir sie nicht simulieren können. Die Autoren gehen dann noch etwas näher darauf ein, da diese

**Geschichte
keineswegs settled
ist, und kommen zu
dem Ergebnis:
*Alles in allem
zeigt das Fehlen
sowohl
Jahrtausende
langer
Warnereignisse im
Süden und abrupter
Ereignisse im***

***Norden sehr
deutlich, dass in
unserem Modell
eine wesentliche
Rückkopplung mit
ziemlicher
Bedeutung fehlt.***

CO2 -

Rück

korpp

Lung

Die

Proz

esse

,

die

dazu

führe

en,

dass

hīnr

eīch

ende

Meng

en

Kohl

enst

off

in

den

Tief

en

der

eisz

eitzl

iche

n

Ozea

ne

abge

Lage

rt

werd

en,

um

die

in

den

Eísb

ohrk

erne

n

erke

nnba

ren

atmo

sphä

risc

hen

co2-

KonZ

entr

atio

nen

zu

erze

ugen

,

sind

nicht

t

sehr

gut

vers

tand

en .

Sie

wurd

en

bis

heut

e

noch

ní ch

t

von

eine

m

real

isti

sche

n

geko

ppel

ten

Mode

ll

erfo

lgre

ich

sich

hier

t.

FAMO

US,

in

dies

er

Stud

ie

verw

ende

t,

enth

ält

ein

inf

ache

s

Bíog

epoch

emie

-

Mode

11,

obwo

hl

es

ní ch

t

auf

die

Antr

iebe

in

dies

en

Simu

lati

onen

reag

iert

,

eine

zusä

tzli

che

Aufn

ahme

von

Kohl

erst

off

aufz

uneh

men .

Eine

weit

ere

FAMO

US -

S'imu

lati

on

mit

inte

rakt

ivem

atmo

sphä

riSc

hem

coz

hat

kein

erle

i

sígn

í fík

ante

**Ände
rung
en**

des

CO2 -

Geha

Ltes

der

Atmo

sphä

re

geze

itig

t,

wenn

orbī

taŀe

Vari

atio

nen

und

wach

send

e

Nord

-

EiSS

chil

de

als

Antr

ieb

wirk

sam

ware

n.

Dìe

gena

ue

Mode

llie

rung

eíne

s

Eísz

eitz

ykzu

s'

erfo

rder

t

eine

sign

ifik

ante

Zuna

hme

unse

res

Vers

tänd

niss

es

der

***·
ihvo***

lvie

rten

Proz

esse

und

nicht

t

einf

ach

die

Eínb

ezíe

hung

von

ein

wenig

g

mehr

Komp

Lexi

tät

in

das

jetz

ige

Mode

11.

Sc

htl

us

S f

ol

ge

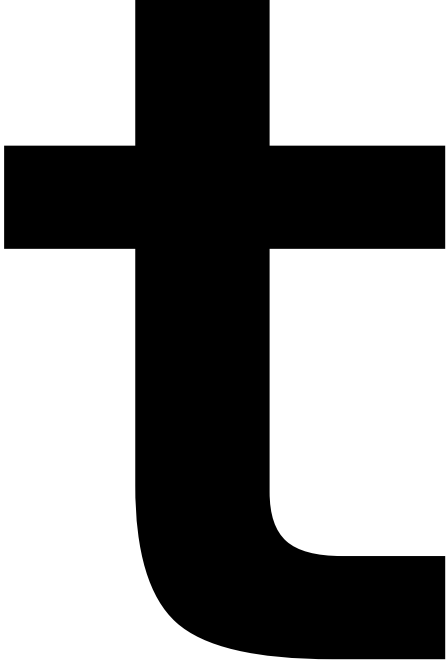
ru

ng

Di

es

i's



ei

ne

se

hr

in

te

re

SS

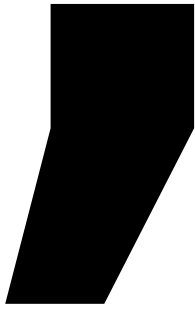
an

te

St

ud

ie



di

e

ei

ni

ge

Er

fo

lg

e

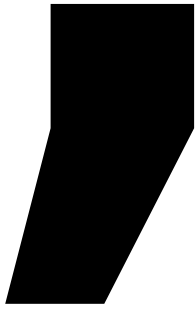
he

rv

or

he

bt



Gr

en

ze

n

de

r

Re

ch

en

ka

pa

zi

tä

te

n

au

f

z

ei

gt

so

wi

e

ka

um

ve

rs

ta

nd

en

e

so

wi

e

fe

htl

en

de

Rü

ck

ko

pp

rw

ng

en

in

KL

im

am

od

el

le

n



Di

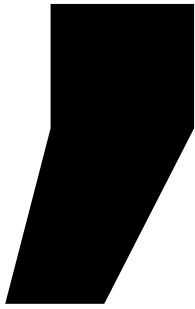
e

Ta

ts

ac

he



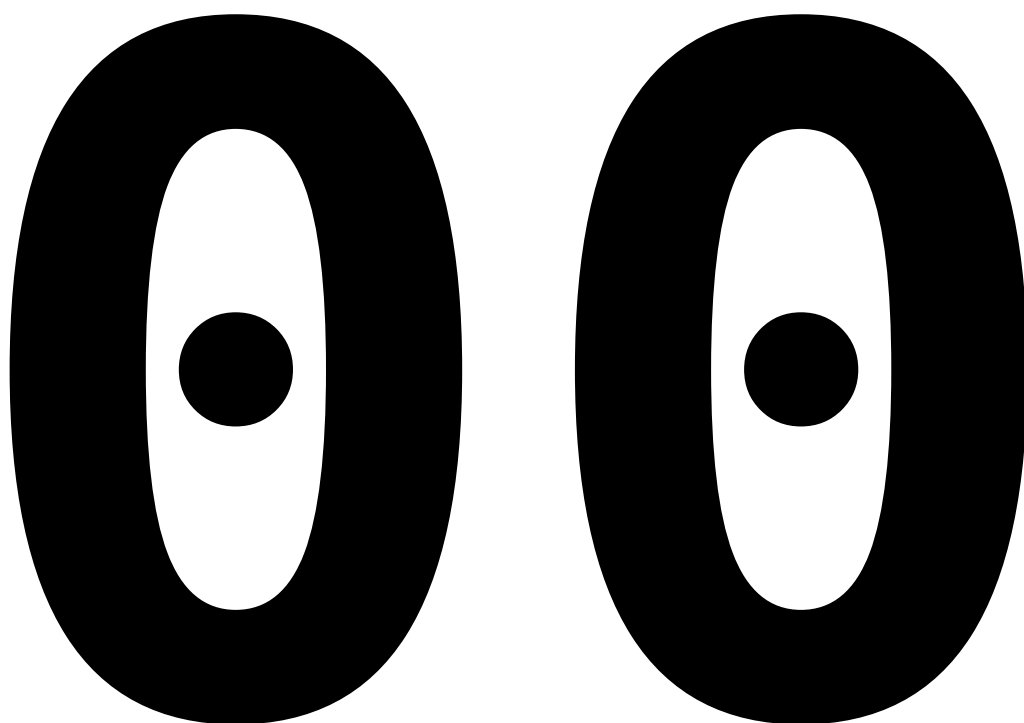
da

SS

12

0





0

Ja

hr

e

KL

im

ag

es

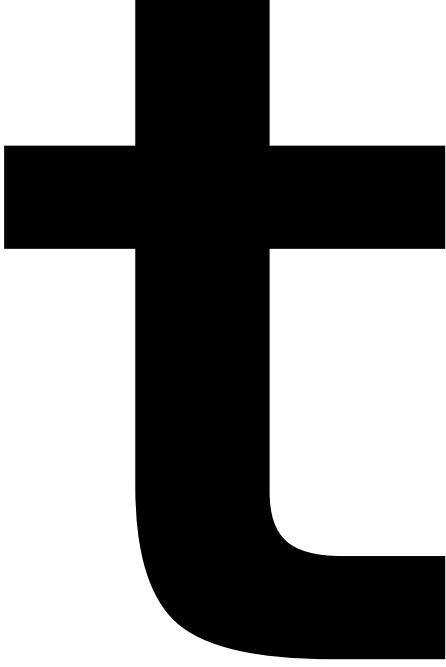
ch

ic

ht

e

mi



e.i.

ne

m

vo

U

U

st

■ ■
än

di

ge

n

GC

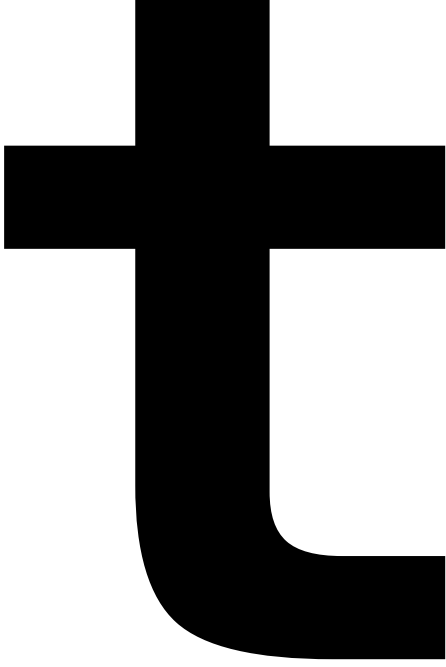
M

Si

mu

Li

er



we

rd

en

ko

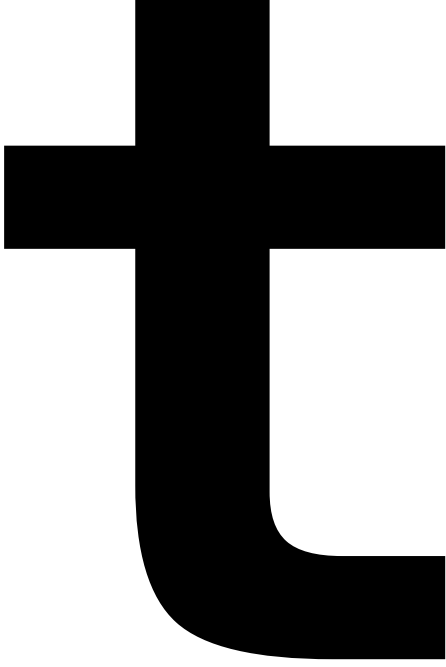
nn

te

n

,

i's



sc

hö

n

zu

se

he

n



Da

S

Fe

htl

en

ab

ru

pt

er

KL

im

ä ä

nd

er

un

ge

n

in

de

r

Si

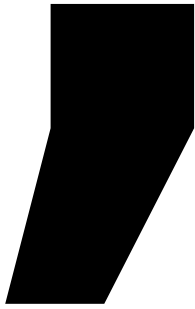
mu

La

七

一

on



da

S

Sc

he

い

ち

er

n

,

di

e

ra

sc

he

Te

mp

er

at

ur

ab

na

hm

e

zu

Be

gi

nn

de

r

Au

stl

ös

un

g

ei

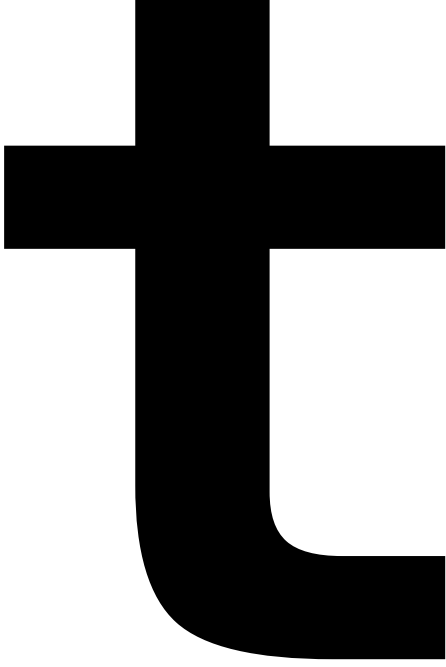
ne

r

Ei

S Z

e.i.



na

ch

zu

vo

U

U

zi

eh

en

un

d

di

e

fe

htl

en

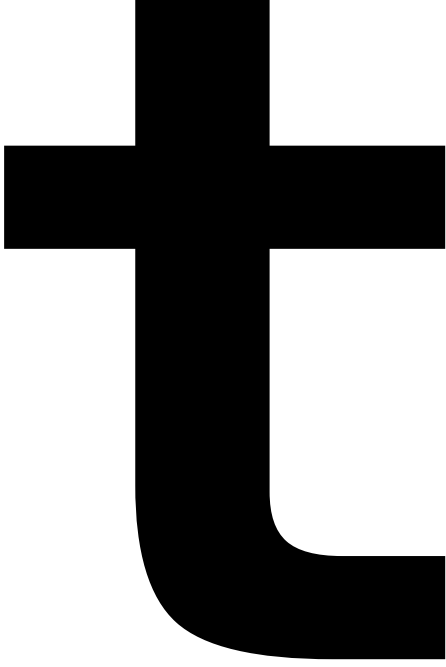
de

Fä

hi

gk

e.i.



de

r

Mo

de

U

U

e,

wi

ch

七 立

ge

Rü

ck

ko

pp

rw

ng

en

zu

mo

de

U

U

ie

re

n

,

ze

ig

en

al

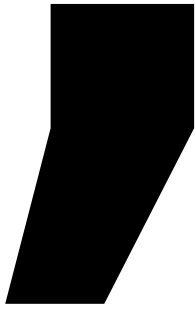
le

zu

Sa

mm

en



da

SS

KL

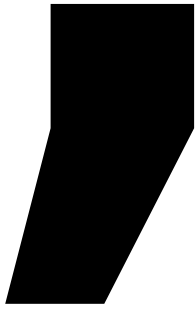
im

am

od

el

le

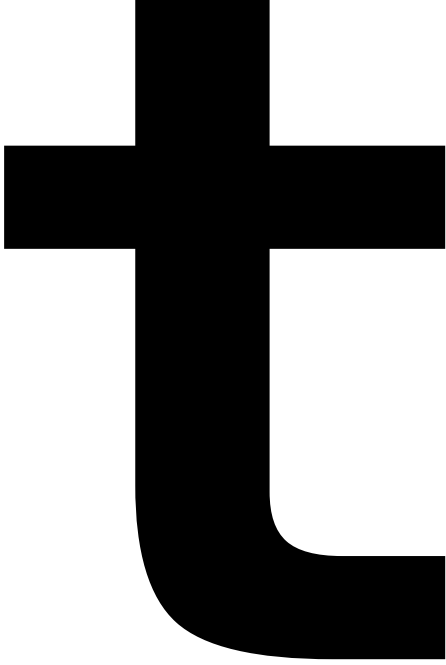


zu

mi

nd

es



so

we

い

て

es

di

e

Ei

S Z

ei

te

n

be

tr

i

f

ft



no

ch

in

de

n

Ki

nd

er

sc

hu

he

n

st

ec

ke

n

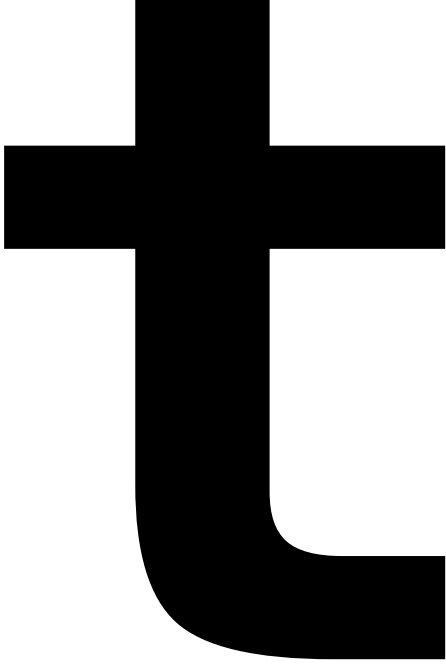


(D

as

he

is



ni

ch

セ

、

da

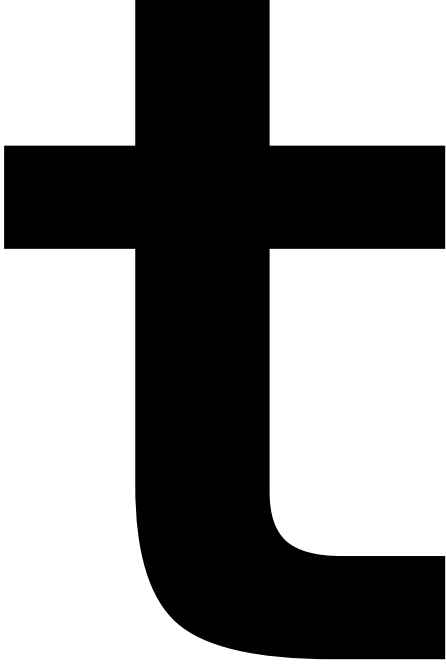
SS

Si

e

ni

ch



au

sg

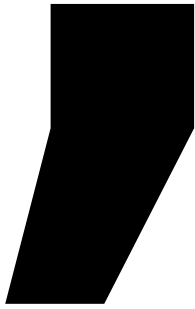
er

e.i.

ft

Si

nd



so

nd

er

n

da

SS

da

S

KL

im

a

ei

n

we

ni

g

hi

nt

er

h ä

l

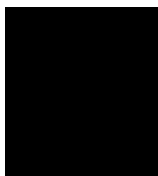
t

ig

i's

七

)



An

me

rk

un

g

1.



FA

MO

us

Di

e

Oz

ea

n

-

Ko

mp

on

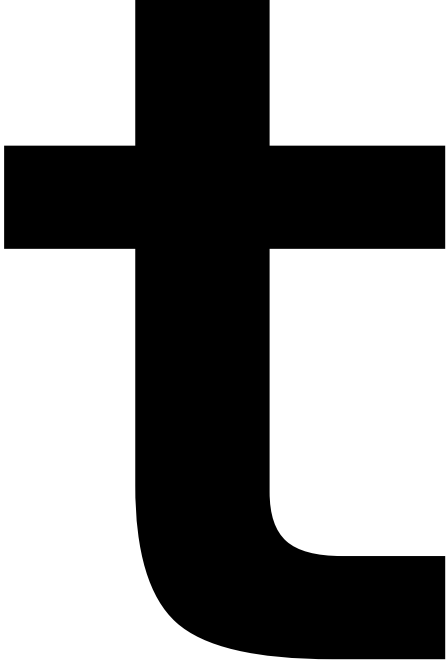
en

te

ba

Si

er



au

f

de

m

ri

gi

d.

Li

d

Co

X

-

Br

ya

n

-

Mo

de

U

U

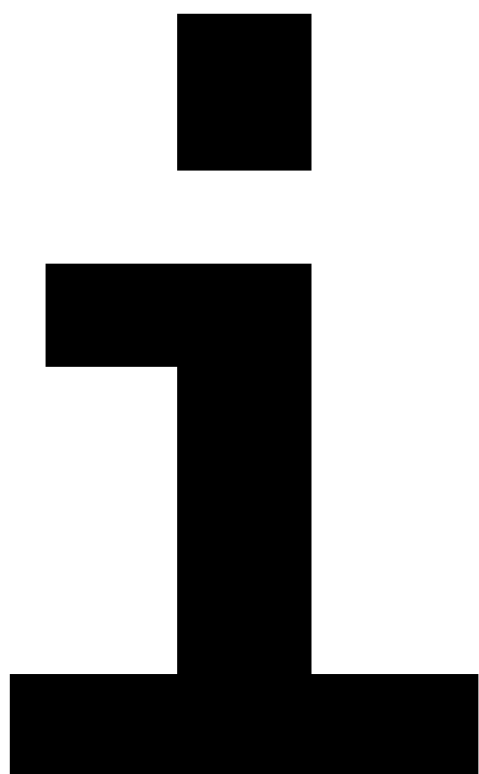
(P

ac

an

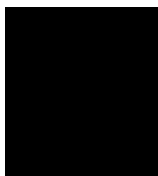
Ow

sk



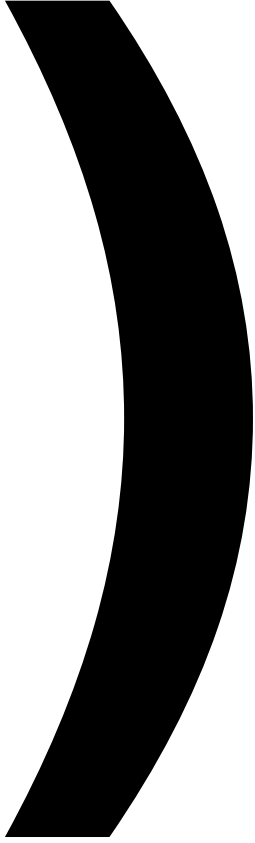
et

al



19

90

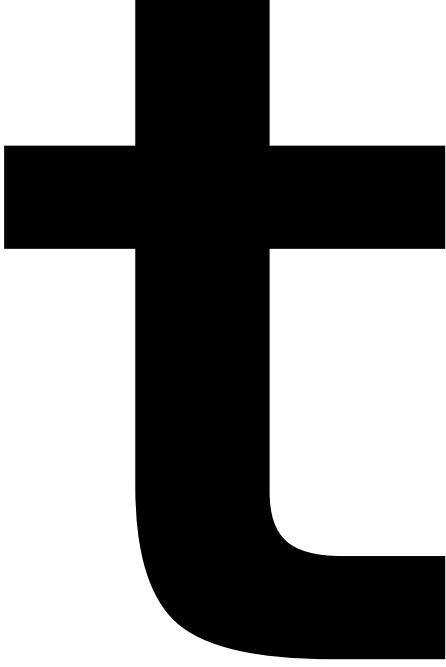


un

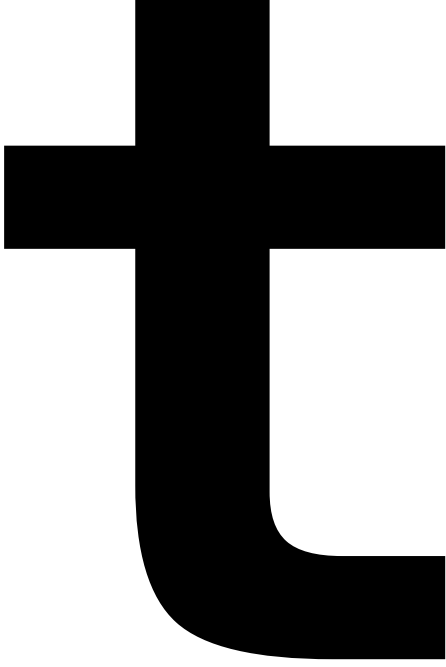
d

lä

uf



mi



ei

ne

r

Au

fl

ös

un

g

vo

n

2

,

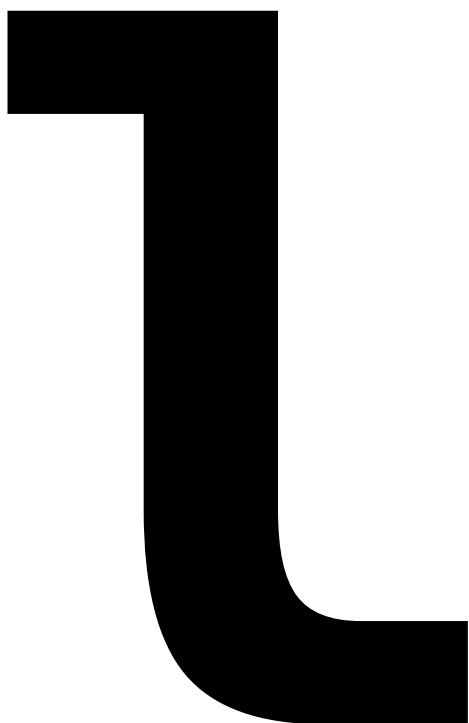
50

Br

e.i.

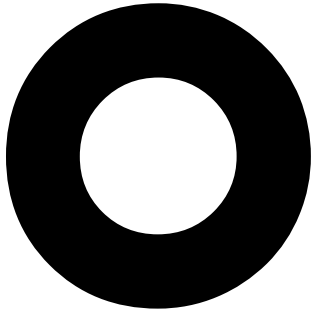
te

ma



3,

75

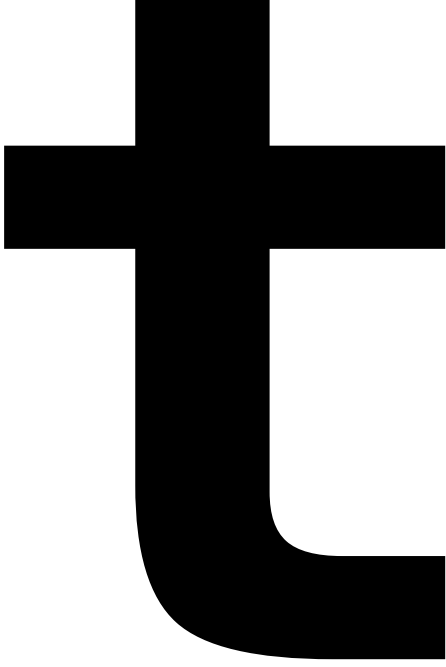


Lä

ng

e

mi



20

ve

rs

ch

ie

de

ne

n

Sc

hi

ch

te

n



Di

e

A

t

mo

Sp

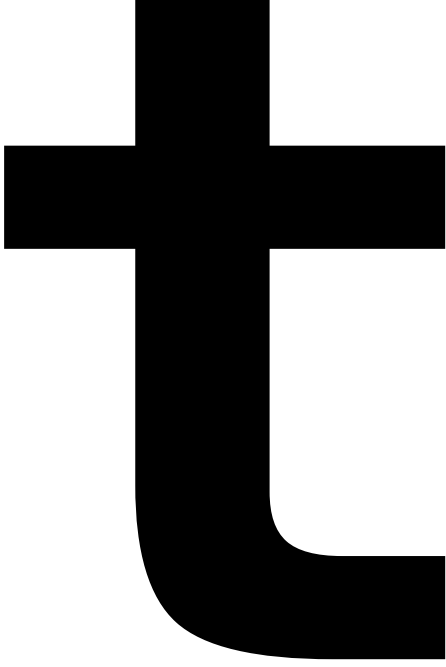
h ä

re

ba

Si

er



au

f

de

n

pr

im

い

て

iv

en

Gl

ei.

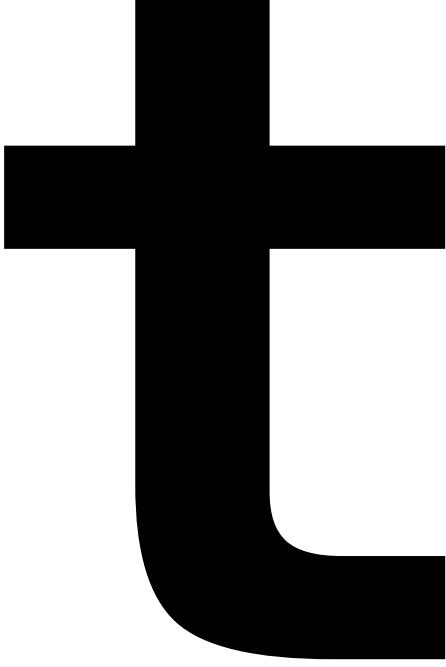
ch

un

ge

n

mi



ei.

ne

r

Au

fl

ös

un

g

vo

n

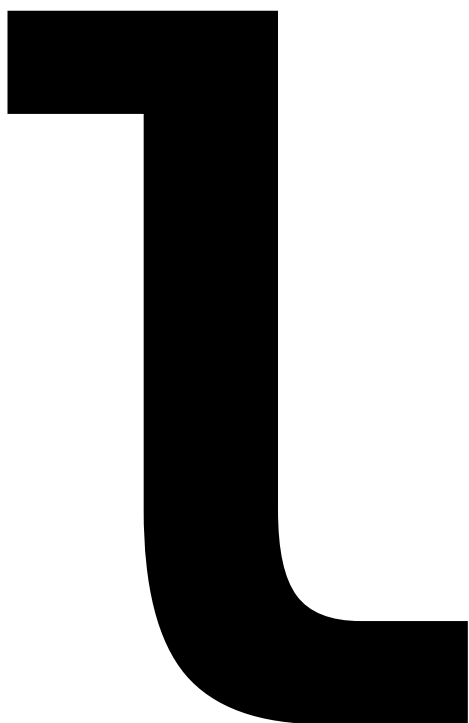
50

Br

ei

te

ma



7

,

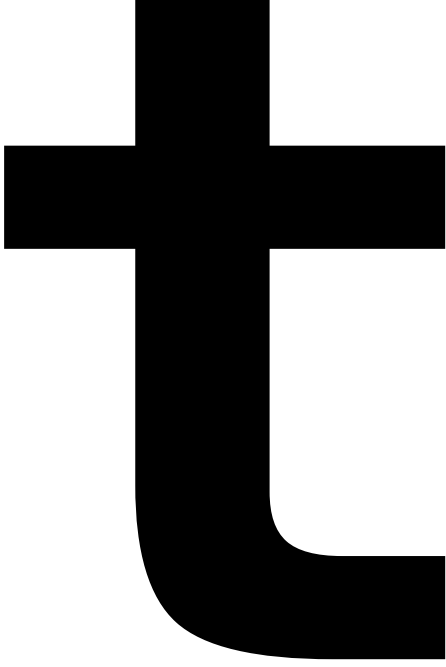
50

Lä

ng

e

mi



1

1

ve

rs

ch

ie

de

ne

n

Sc

hi

ch

te

n



Di

e

XD

BU

A

-

ve

rs

io

n

vo

n

F

A

MO

us

(h

ie

rn

ac

h

ei.

nf

ac

h

F

A

MO

us

ge

na

nn

七

;

Si

eh

e

Sm

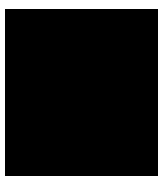
い

ち

h

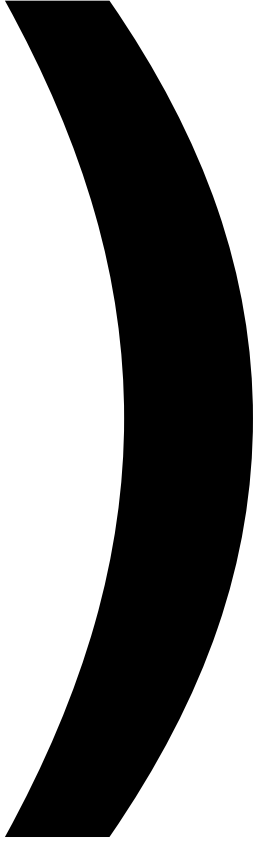
et

al

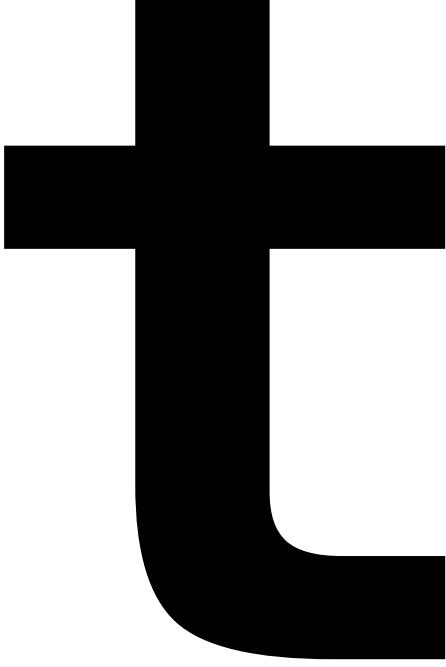


20

08



ha



e.i.

n

vo

ri

nd

us

tr

ie

U

U

es

Ko

nt

ro

U

U

kl

im

a,

da

S

in

ge

e.i.

gn

et

er

We

i's

e

de

m

vo

n

Ha

dc

M3

gl

ei

ch

七

ノ

ob

wo

ht

F

A

MO

us

in

ho

he

n

Br

e.i.

te

n

de

r

No

rd

he

mi

Sp

h ä

re

im

wi

nt

er

e.i.

ne

Ka

l

t



ve

rz

er

ru

ng

vo

n

et

wa

50

C

au

fw

ei.

st

im

ve

rg

le

ic

h

zu

Ha

dc

M3

(g

em

い

て

te

l

t

nö

rd

Li

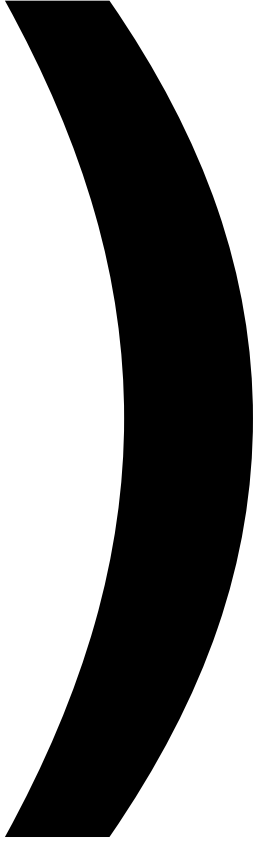
ch

vo

n

40

ON



Al

S

Fo

lg

e

wi

rd

di

e

wi

nt

er

Li

ch

e

Ei

Sa

us

de

hn

un

g

im

No

rd

at

La

nt

ik

ub

er

sc

h ä

t

z

七

。

Di

e

gl

ob

al

e

KL

im

as

en

Si

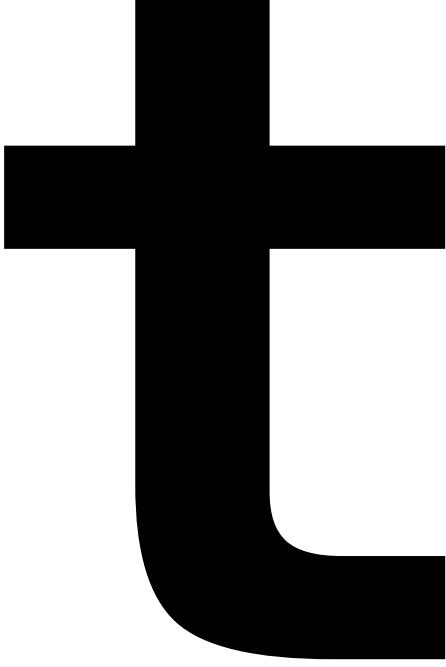
七

一

七

vi

tä



vo

n

FA

MO

us

au

f

ei

ne

zu

na

hm

e

de

S

at

mo

Sp

h ä

ri

sc

he

n

CO

2

2

Ge

ha

l

t

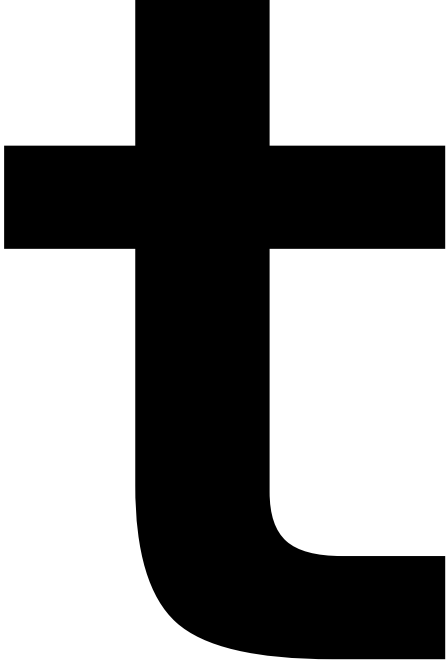
es

je

do

ch

i's



äh

nl

ic

h

de

r

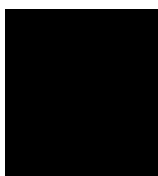
vo

n

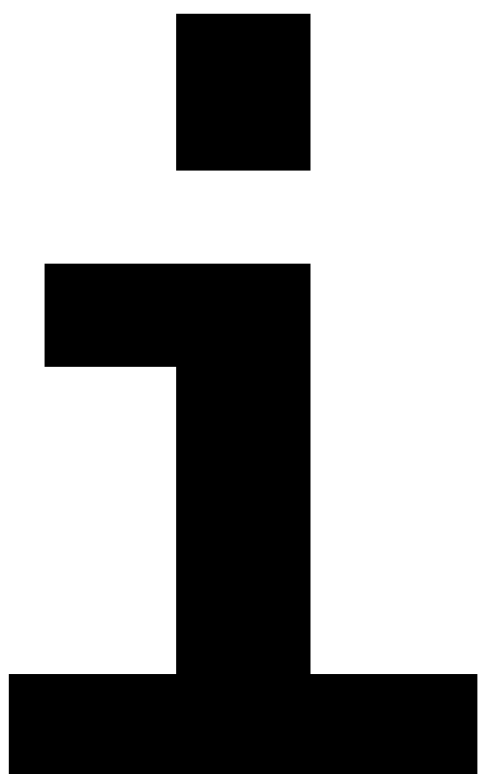
Ha

dc

M3



Be



FA

MO

us

gi

bt

es

ei.

ne

Re

ih

e

vo

n

Un

te

rs

ch

ie

de

n

im

ve

rg

le

ic

h

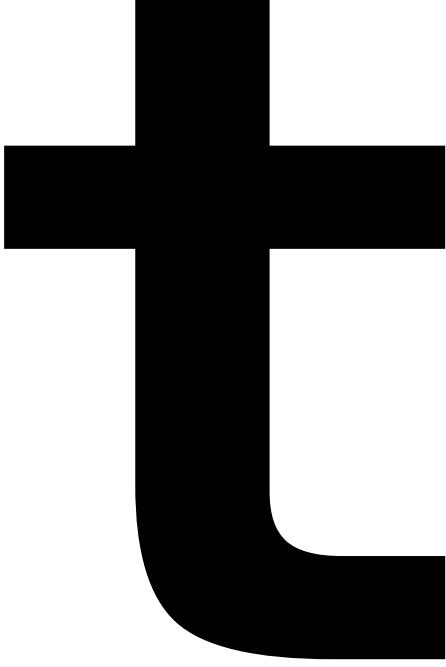
zu

Ha

dc

M3

mi

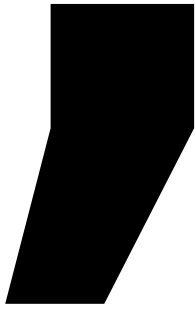


de

m

zi

el



di

e

KL

im

as

im

ut

at

io

n

zu

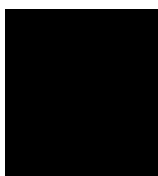
ve

rb

es

se

rn



So

wu

rd

e

zu

m

Be

i's

p

i

el

Is

La

nd

en

t

f

er

nt

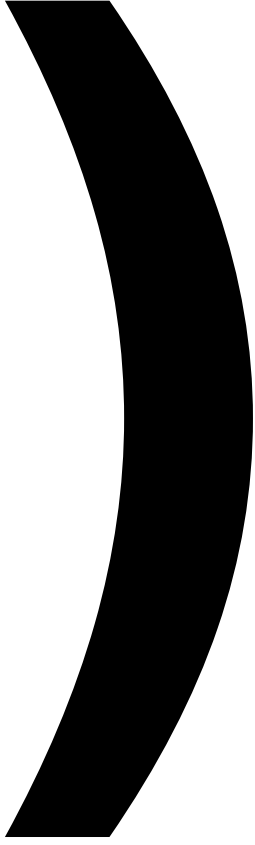
(5

on

es

20

03



um

ei

ne

n

st

är

ke

re

n

Wä

rm

et

ra

ns

po

rt

im

No

rd

at

La

nt

ik

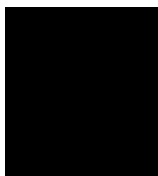
zu

er

zi

el

en



Sm

い

て

h

un

d

Gr

eg

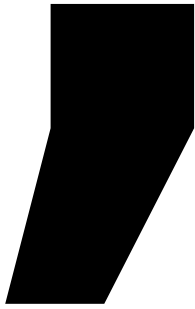
or

y

ze

ig

en



da

SS

di

e

Se

ns

い

ち

iv

い

て

ät

de

r

A

t

La

nt

ic

me

ri

di

on

al

ov

er

tu

rn

in

g

Ci

rc

ut

at

io

n

(A

MO

C)

hi

ns

ic

ht

Li

ch

St

ör

un

ge

n

in

di

es

er

ve

rs

io

n

vo

n

FA

MO

us

et

wa

in

de

r

Mi

七

七

e

de

r

Ba

nd

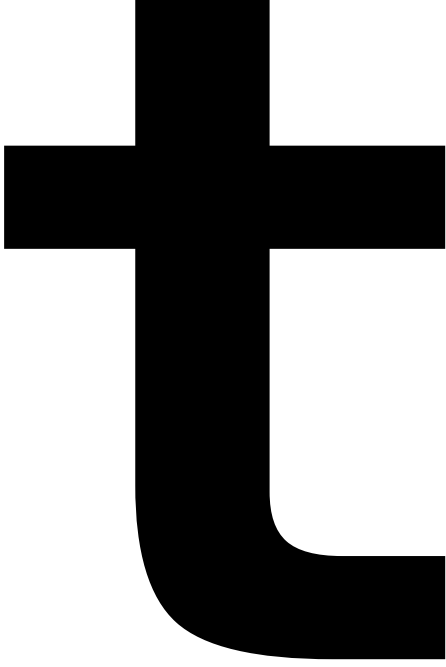
br

ei

te

Li

eg



im

ve

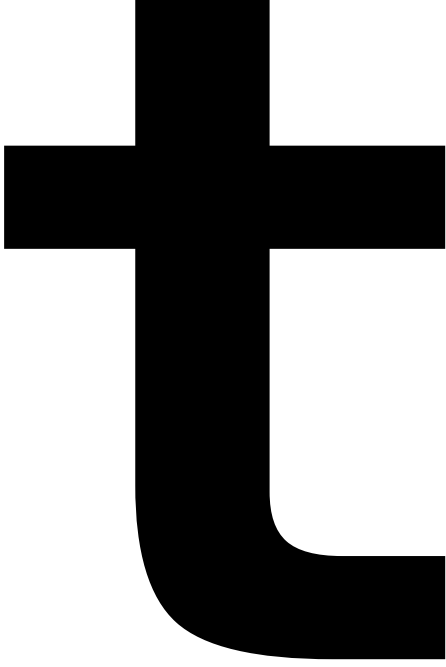
rg

le

ic

h

mi



vi

el

en

an

de

re

n

ge

ko

pp

el

te

n

KL

im

am

od

el

le

n



Da

S

in

di

es

er

St

ud

ie

ve

rw

en

de

te

Mo

de

U

U

un

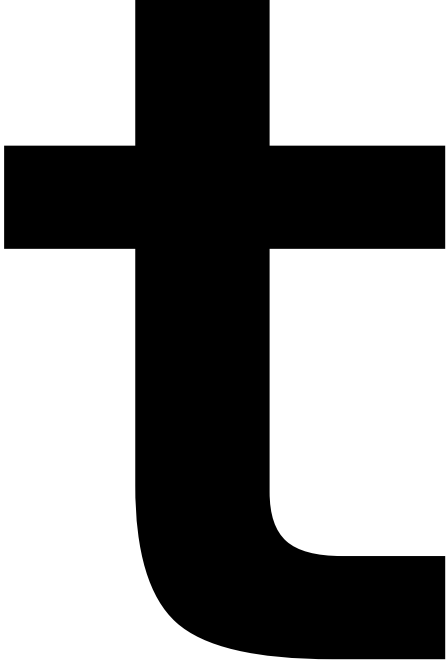
te

rs

ch

ei.

de



Si

ch

vo

n

XD

BU

A

FA

MO

us

da

du

rc

h

,

da

SS

zw

ei

te

ch

ni

sc

he

Bu

gs

im

Co

de

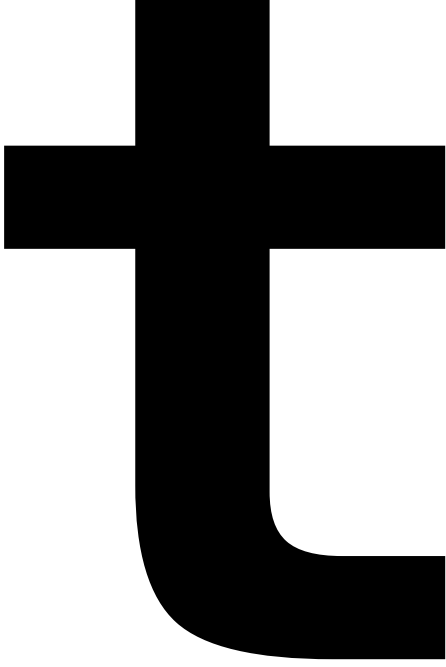
fe

st

ge

ma

ch



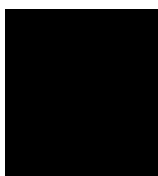
wo

rd

en

Si

nd



FL

üs

se

vo

n

La

te

nt

er

un

d

fü

htl

ba

re

r

Wä

rm

e

au

S

de

m

Oz

ea

n

wu

rd

en

fä

LS

ch

Li

ch

al

S

Te

il

de

r

Ko

pp

rw

ng

S.



Ro

ut

in

e

an

ge

se

he

n

,

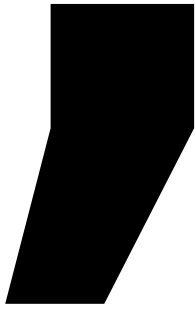
un

d

Sc

hn

ee



de

r

au

f

Me

er

ei

S

an

Kü

st

en

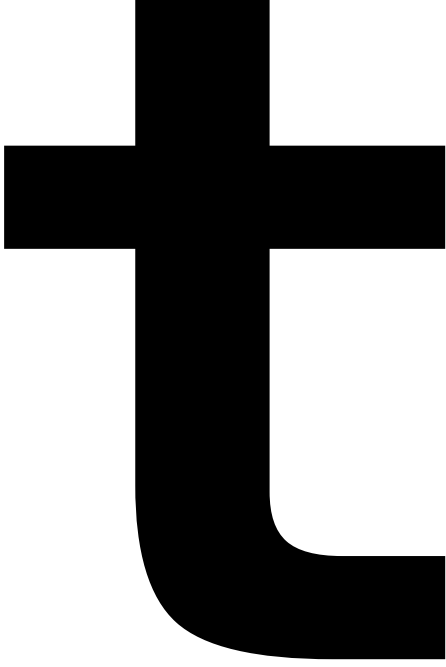
fä

ll

セ

、

i's



de

m

Mo

de

U

U

ve

rt

or

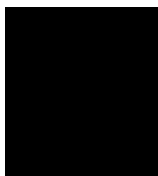
en

ge

ga

ng

en



Di

e

Ko

rr

ek

tu

r

di

es

er

Fe

htl

er

fü

hr

te

zu

ei.

ne

r

zu

sä

tz

Li

ch

en

Ka

l

t



ve

rz

er

ru

ng

vo

n

ei

ne

m

Gr

ad

od

er

so

in

Kü

st

en

ge

bi

et

en

ho

he

r

Br

ei.

te

n

in

Be

zu

g

au

f

XD

BU

A

'

do

ch

ga

b

es

ke

in

e

we

se

nt

Li

ch

en

Än

de

ru

ng

en

de

r

Mo

de

U

U



KL

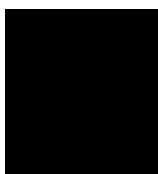
im

at

ol

og

ie



Au

Re

rd

em

wu

rd

e

di

e

gr

un

dl

eg

en

de

To

po

gr

ap

hi

e

de

S

Fe

st

La

nd

es

in

di

es

en

Lä

uf

en

au

S

de

n

mo

de

rn

en

We

rt

en

de

S

IC

E

-

5G



Da

te

ns

at

ze

S

in

te

rp

ol

ie

rt

(P

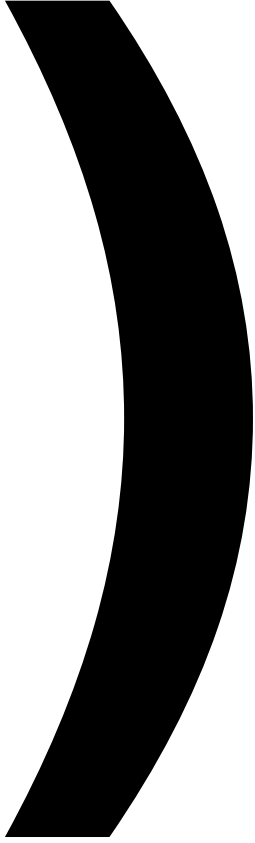
el

七 立

er

20

04



Si

e

un

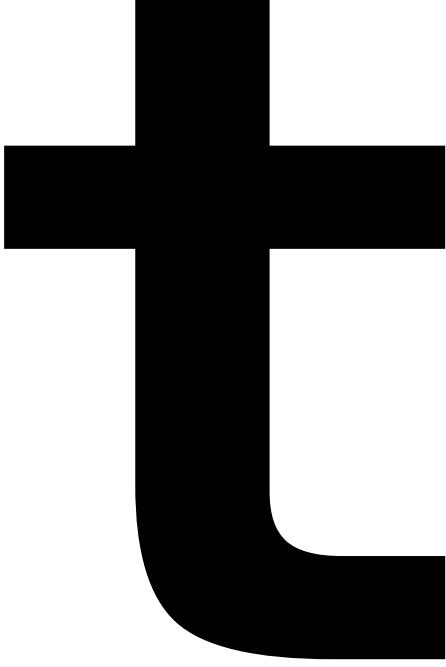
te

rs

ch

ei

de



Si

ch

in

ge

wi

SS

er

We

i's

e

vo

n

de

r

vo

n

de

r

us



Na

wy

ab

ge

le

い

て

et

en

To

po

gr

ap

hi

e

in

Sm

い

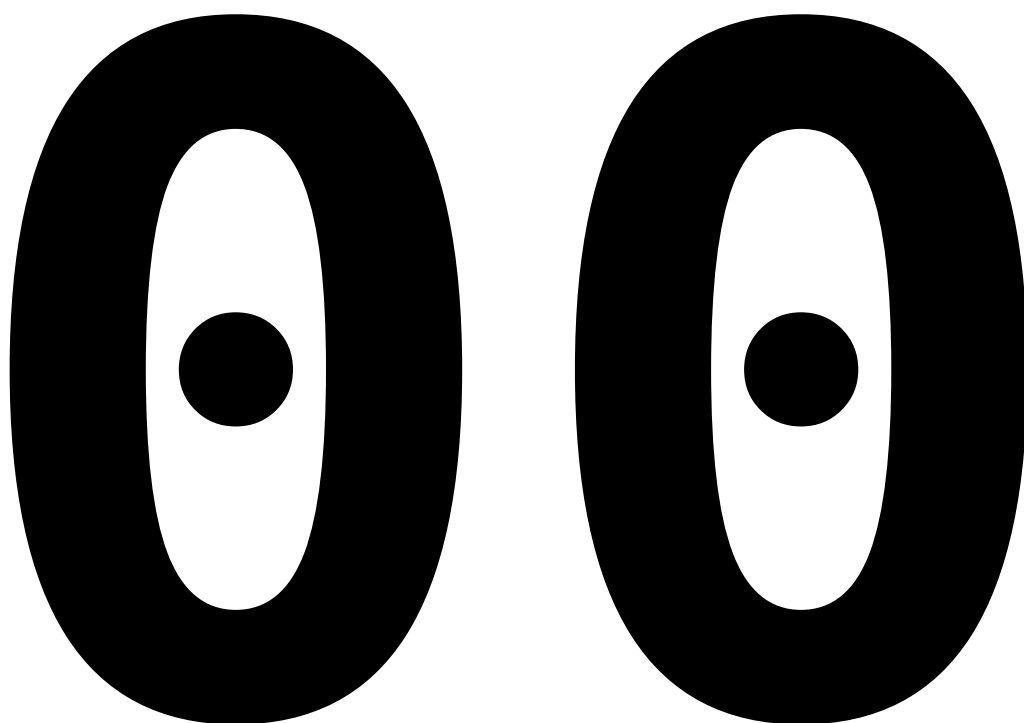
て

h

et

al

(2



8)

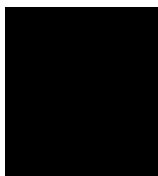
un

d

Ha

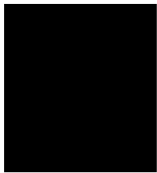
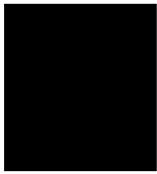
dc

M3



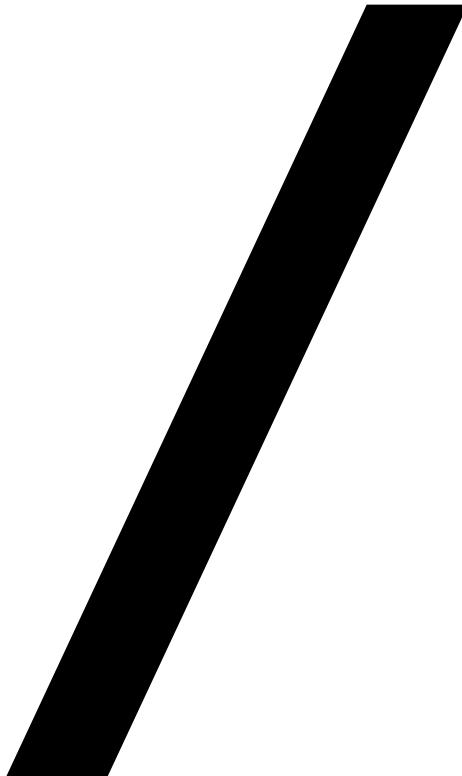
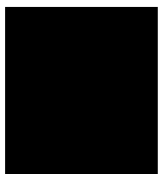
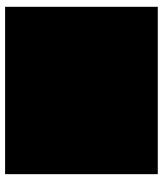
Li

nk



ht

tp



/s

Ci

en

ce

of

do

om



C

om

12

01

3/

12

/3

1

/

gh

OS

ts



of



cl

im

at

es



pa

st



pa

rt



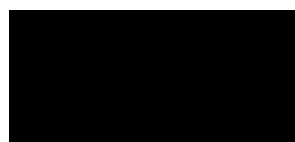
ni

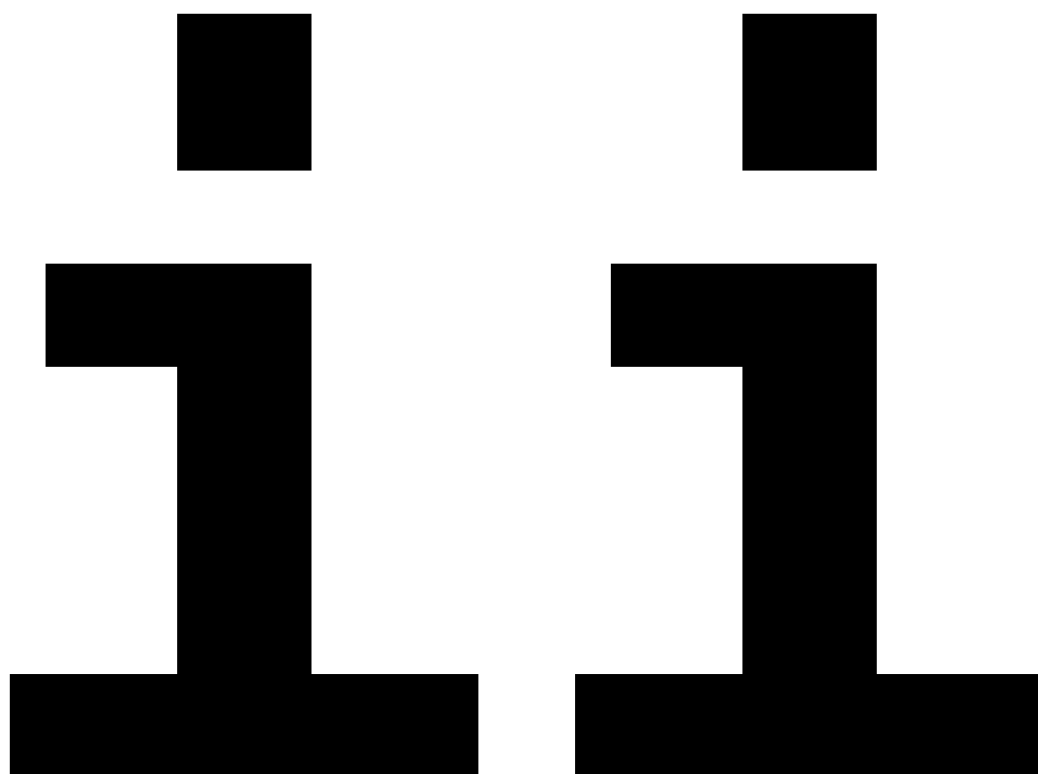
ne

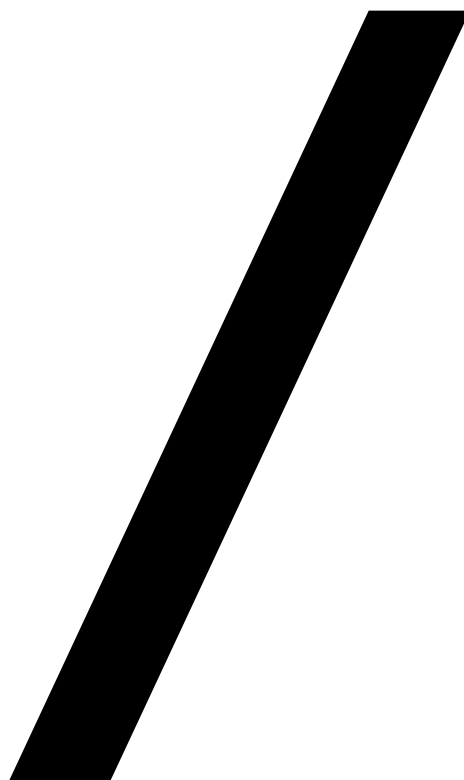
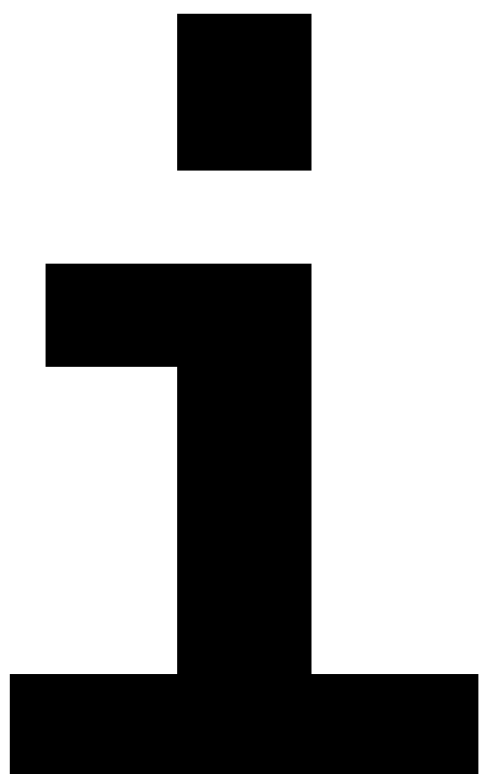


gc

m







Di

e

bi

sh

er

ig

en

Te

il

e



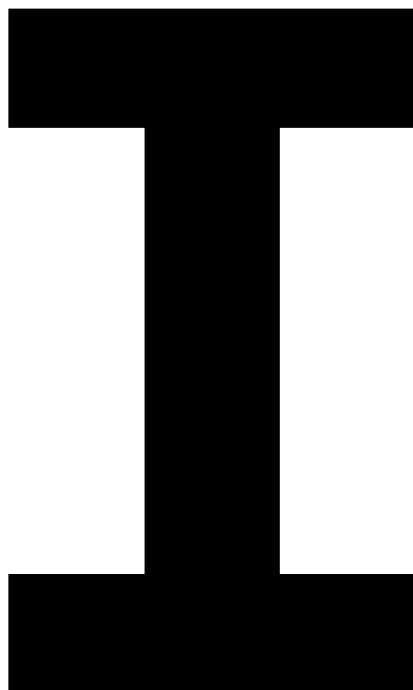
Te

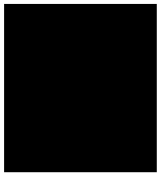
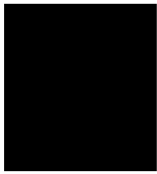
il

I

un

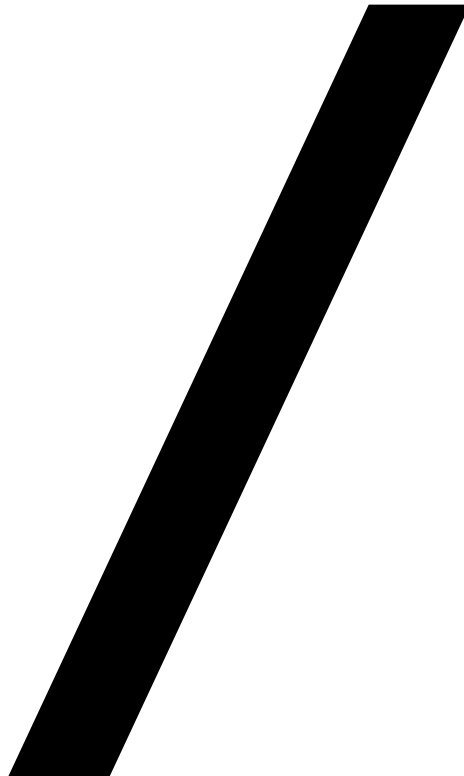
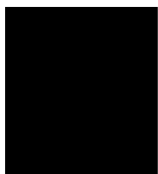
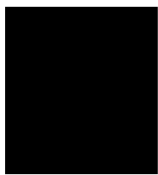
d





ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/c

Li

ma

te

ga

te



an

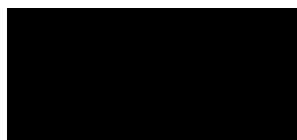
ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r.

e.i.

S Z

ei

te

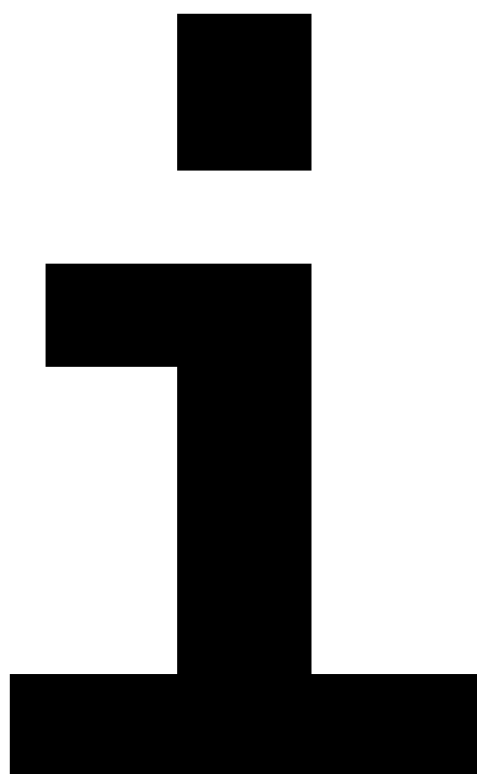
n

-

te

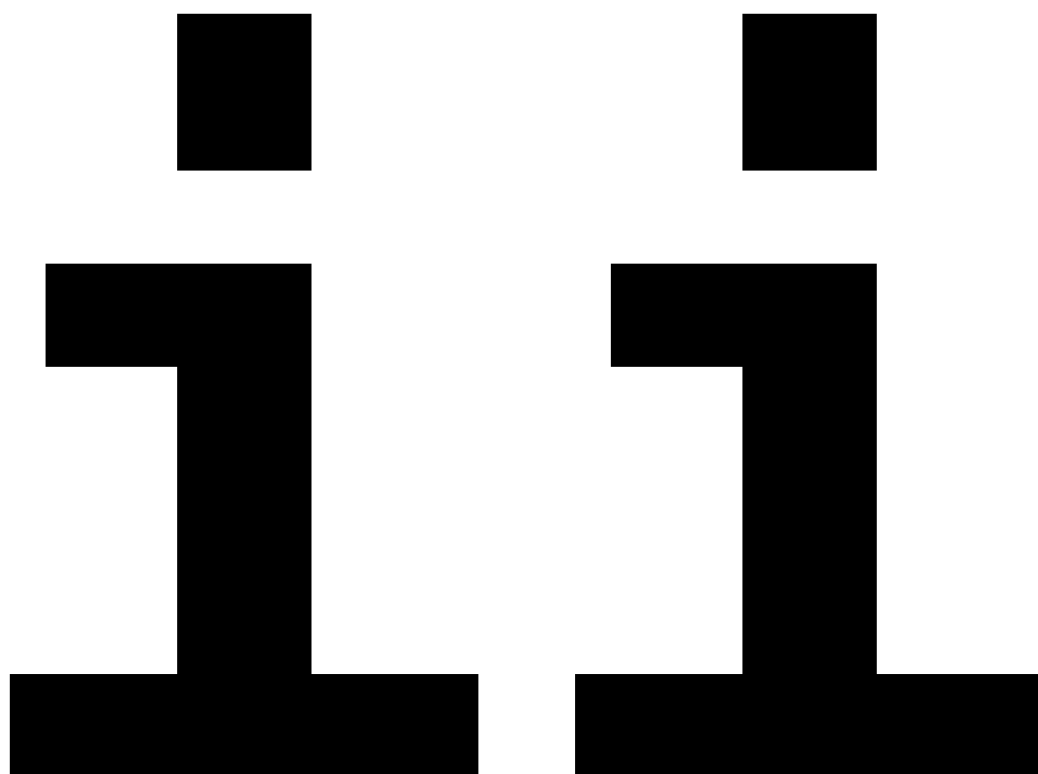
il

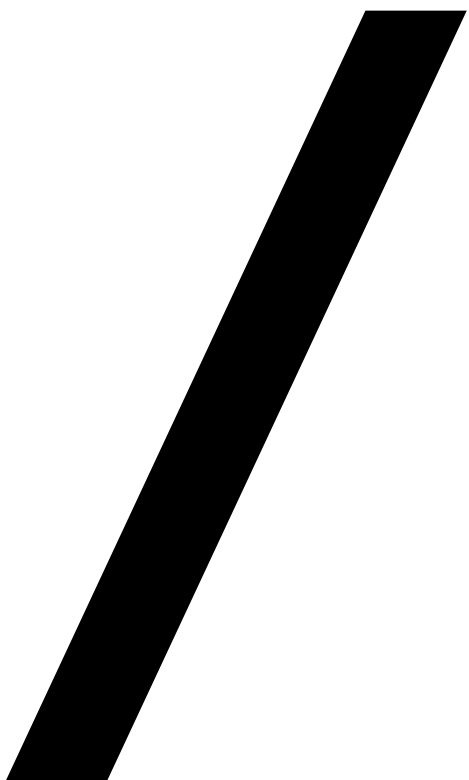




un

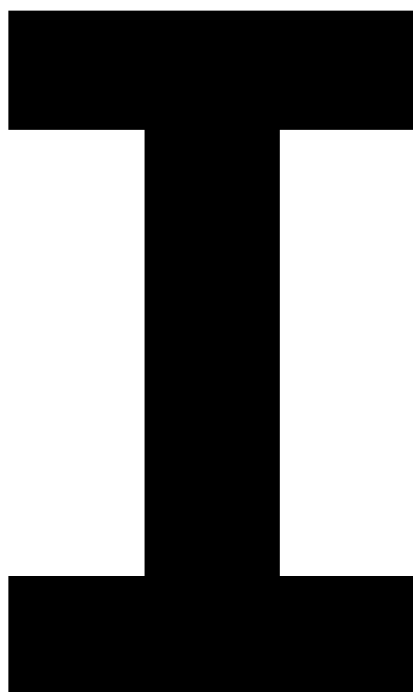
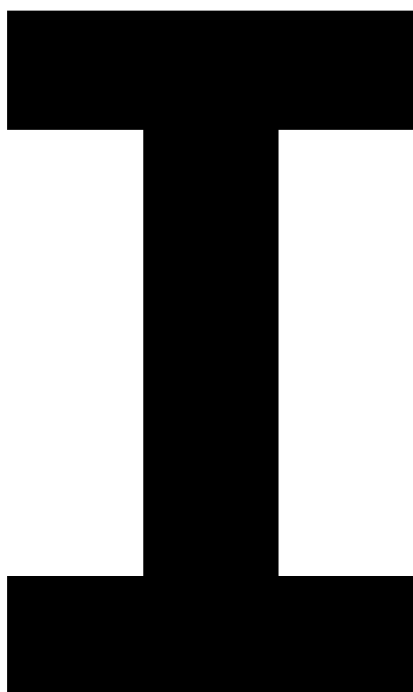
d.





Te

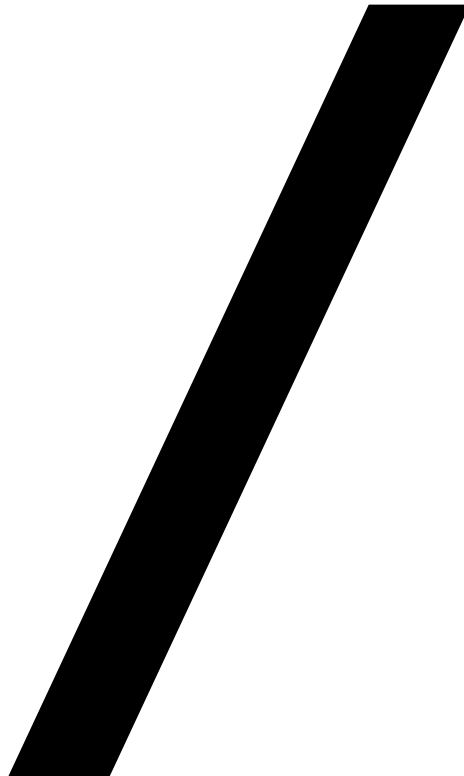
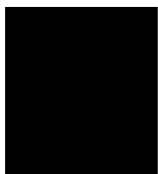
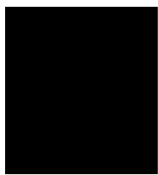
il





ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/c

Li

ma

te

ga

te



an

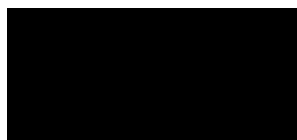
ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r

re

e.i.

S Z

ei

te

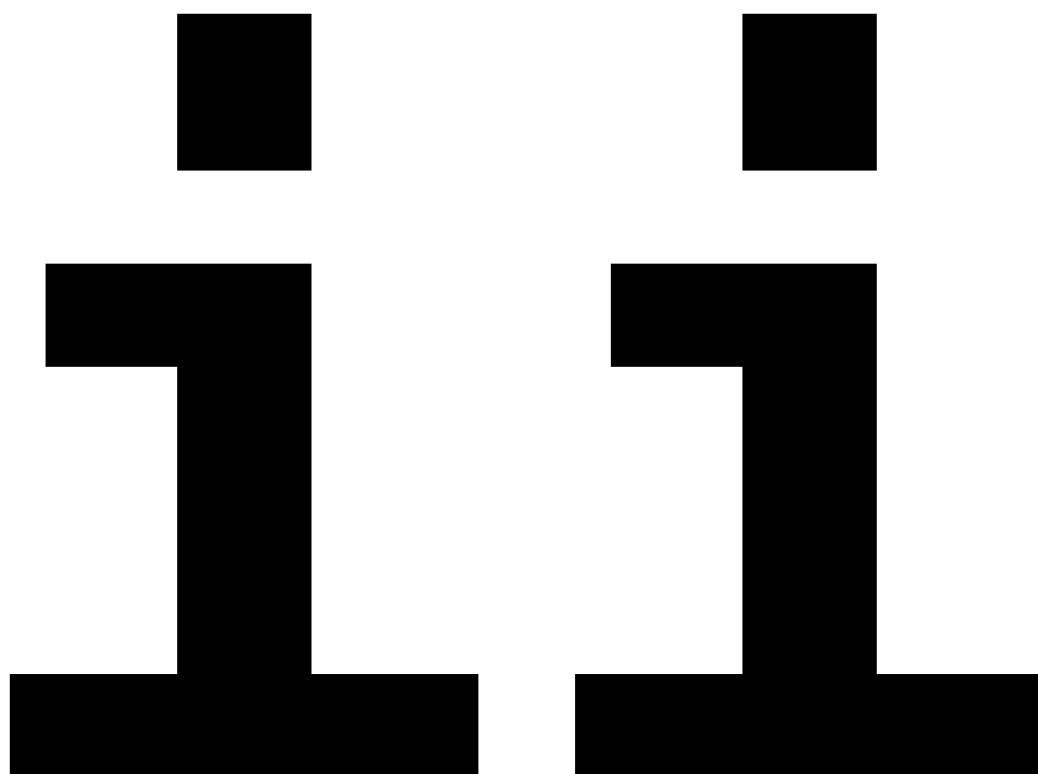
n

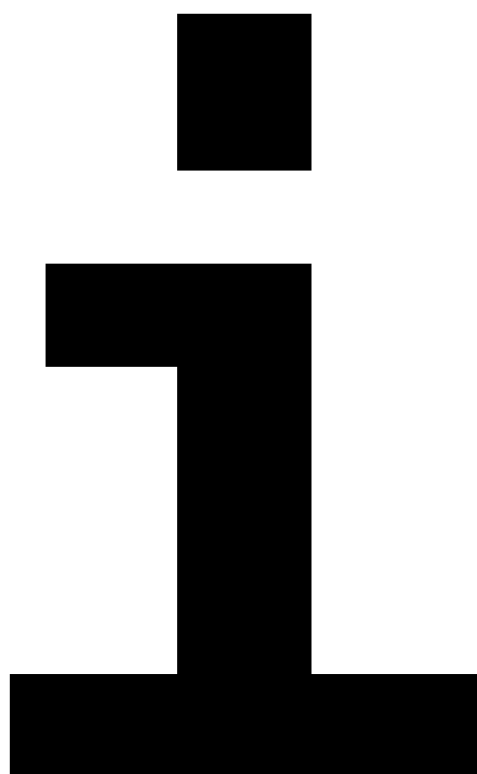
-

te

il







ha

***y*s**



im

br

ie



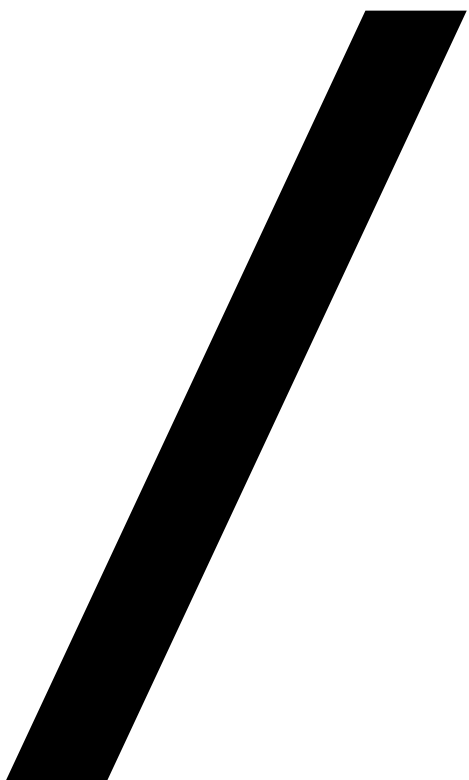
sh

ac

kl

et

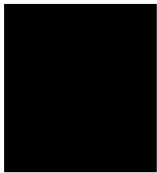
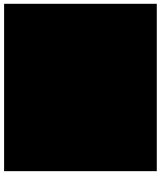
on



Te

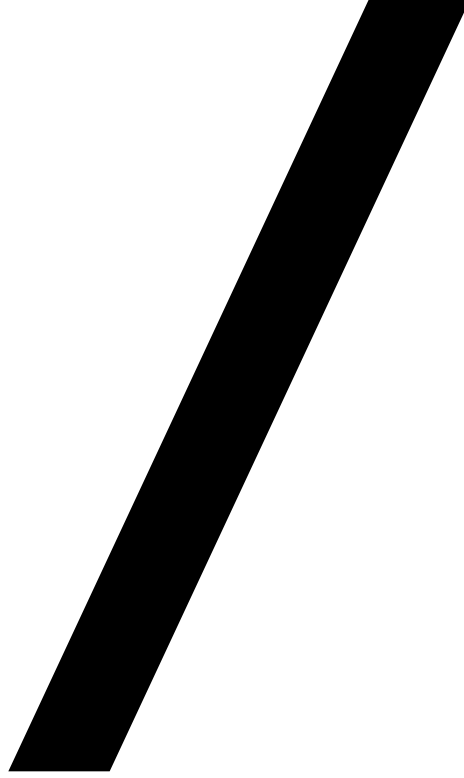
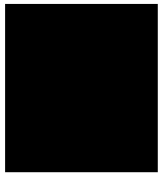
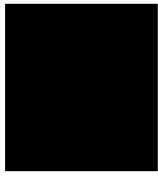
il

IV



ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/c

Li

ma

te

ga

te



an

ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r.

ei

S Z

ei.

te

n

-

te

il



iv



um

La

uf

ba

hn

en



ja

hr

es

ze

い

て

en

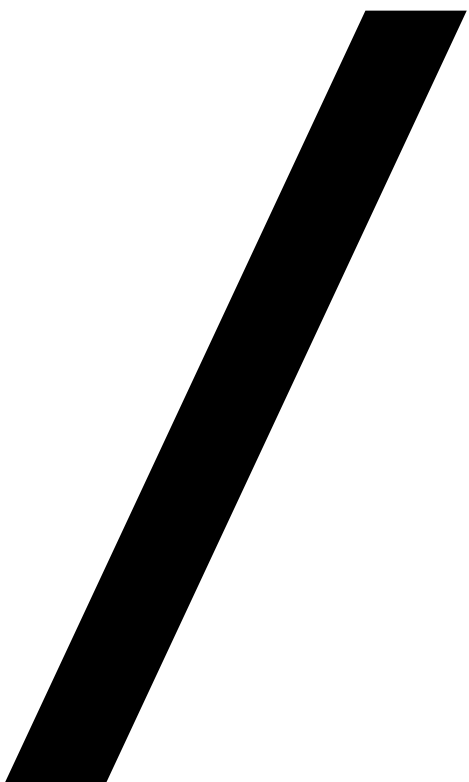


un

d.

me

hr



Te

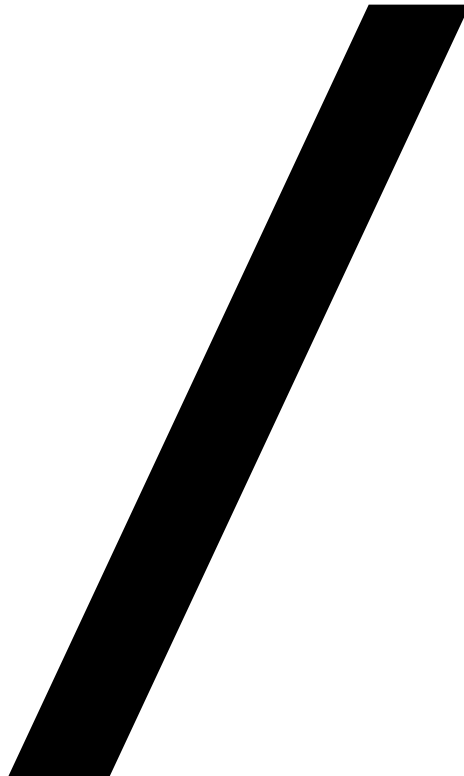
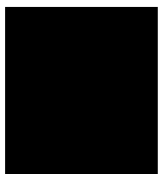
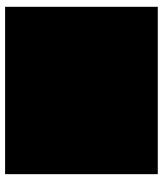
il

V



ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/k

Li

ma



an

ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r.

ei

S Z

ei

te

n

-

te

il



V

U

ae

nd

er

un

ge

n

-

de

r.

ek

Li

pt

ik



un

d.

de

r.

pr

ae

ze

SS

io

n

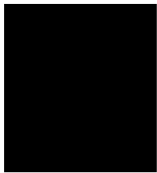
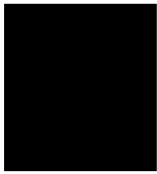
/

Te

il

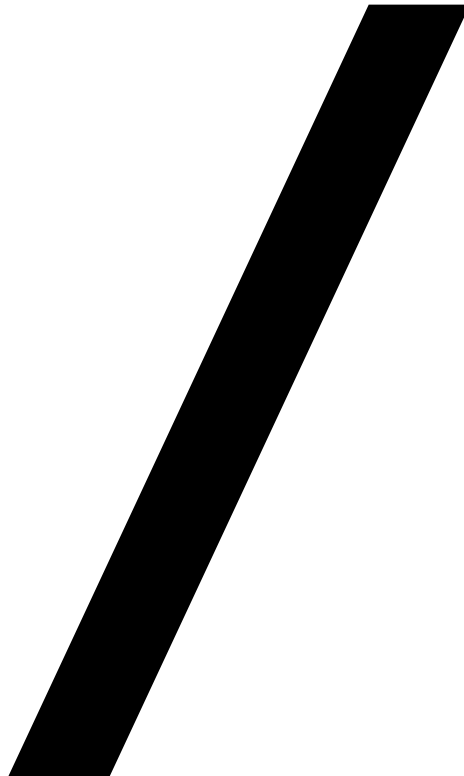
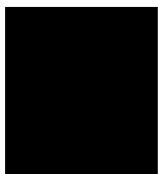
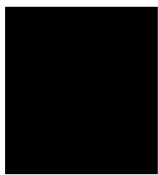
V

I



ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/k

Li

ma



an

ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r

re

e.i.

S Z

e.i.

te

n

-

te

il



vi



hy

po

th

es

en



im



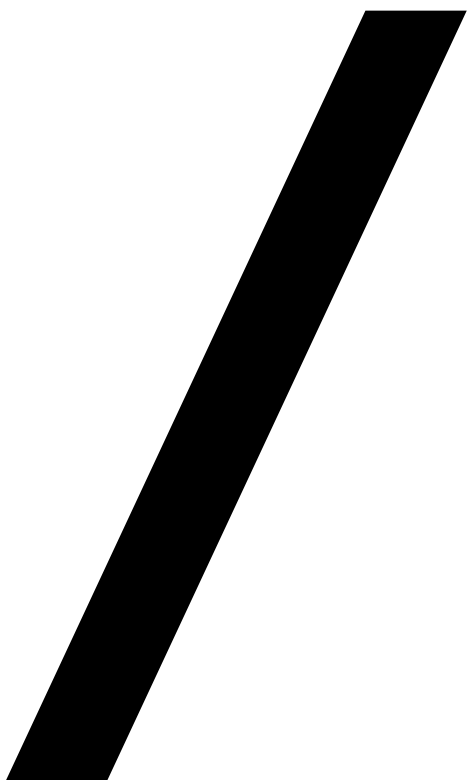
we

be

rf

rw

SS



Te

il

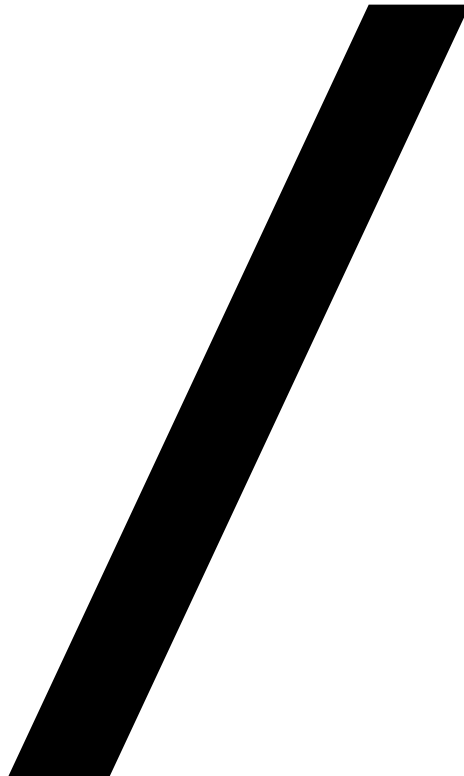
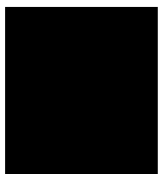
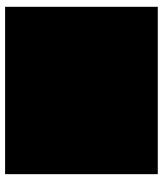
V

I



ht

tp



/w

ww

.e

ik

e -

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/k

Li

ma



an

ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r.

ei

S Z

ei.

te

n

-

te

il

-

7



gl

ob

al



Ci

rc

ut

at

io

n

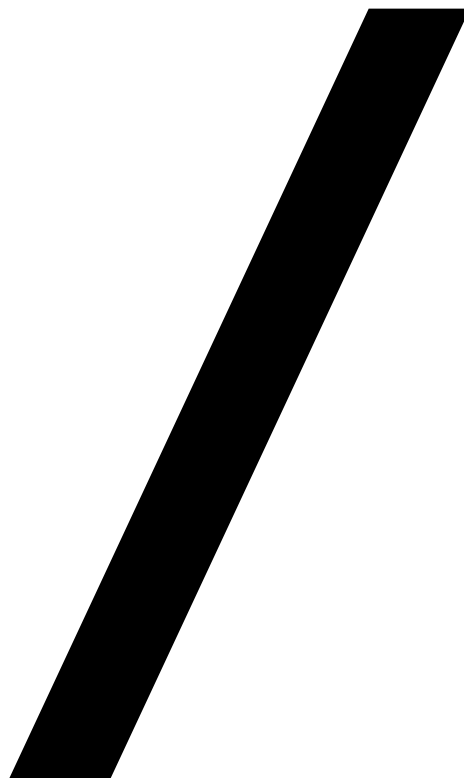
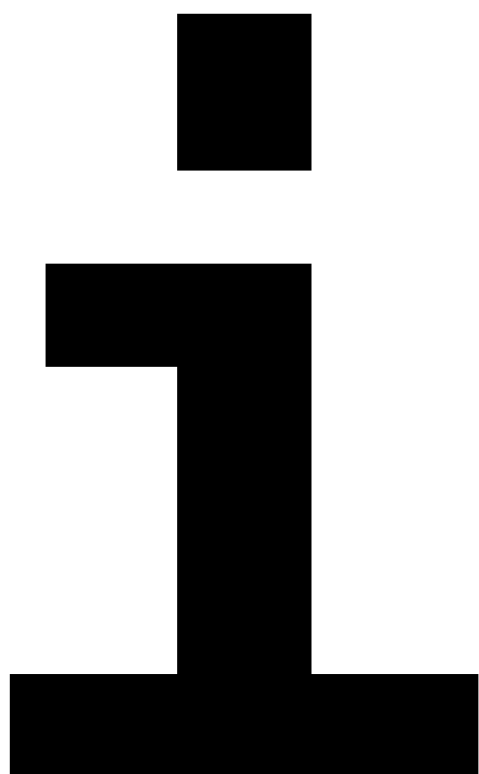
-

mo

de

LS



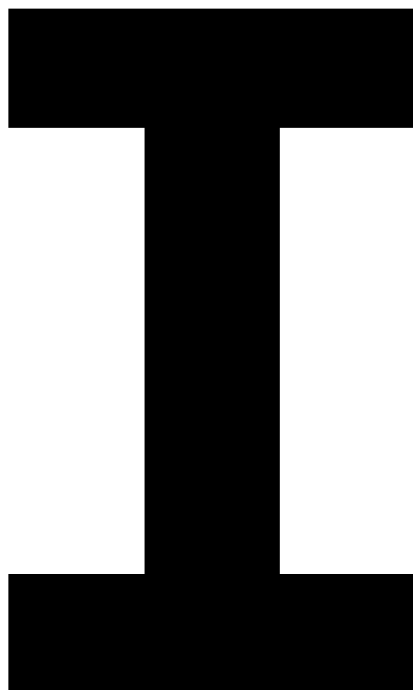
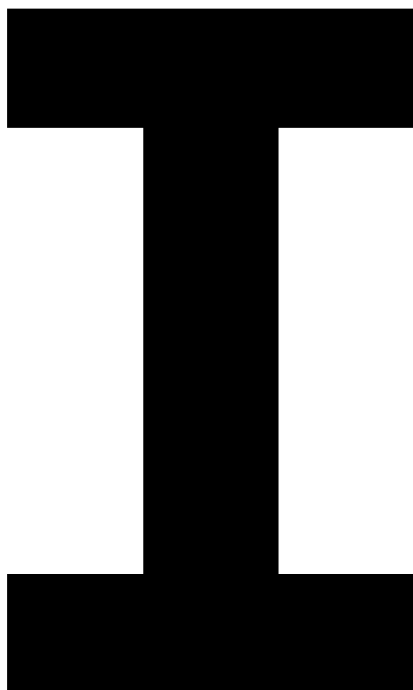


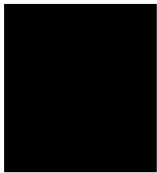
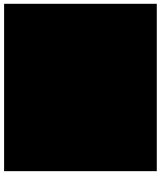
Te

il

V

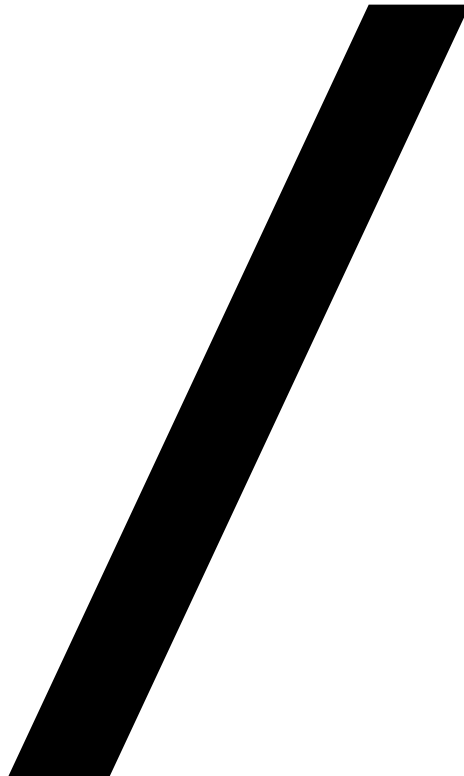
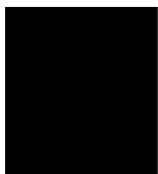
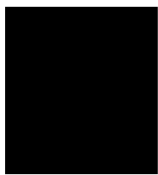
I





ht

tp



/w

ww

.e

ik

e.

kl

im

a.

en

er

gi

e.



eu

/k

Li

ma



an

ze

ig

e/

da

S.



ra

et

se

U

U

de

r

re

e.i.

S Z

e.i.

te

n

-

te

il

- 8



gl

ob

al



Ci

rc

ut

at

io

n

-

mo

de

LS



