# Vanskelige beregninger av enkle utsagn

Herman Ruge Jervell

OMS–seminar
11.04.2008

## Abstract

Det er ikke så veldig interessant med enkle utsagn som kan beregnes enkelt. Heller ikke kompliserte utsagn som må beregnes komplisert. Her ser vi på enkle utsagn som trenger kompliserte og vanskelige beregninger. Jeg vil gi eksempler på dette og vise tilknytning til problemer i kompleksitet og ufullstendighet.

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender
- 11 = en til overs

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender
- 11 = en til overs
- 12 = to til overs

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender
- 11 = en til overs
- 12 = to til overs
- 100 = to hender av to hender

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender
- 11 = en til overs
- 12 = to til overs
- 100 = to hender av to hender
- 1000 = stort hundre

# Arkimedes

## Å telle med store tall

I en liten artikkel på 3 sider viste Arkimedes hvordan en kunne telle antall sandkorn i universet.
Han talte opp til $10^{80}$. Først telle opp til 10. Så ta 10-erskritt for å telle opp til 100. Og så videre.
Dette er den måten vi anskueliggjør store tall.

- 10 = to hender
- 11 = en til overs
- 12 = to til overs
- 100 = to hender av to hender
- 1000 = stort hundre

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$
- Unær konstruktor $s : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$
- Unær konstruktor $s : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$
- Unær konstruktor $s : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$

Dette er de unære tall. I tillegg har vi en notasjon $exy = 2^x + y$ gitt ved

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$
- Unær konstruktor $s : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$

Dette er de unære tall. I tillegg har vi en notasjon $exy = 2^x + y$ gitt ved

# De naturlige tall

- Predikat $\mathcal{N}$ – skriver $x : \mathcal{N}$ eller $\mathcal{N}x$
- Start $0 : \mathcal{N}$
- Unær konstruktor $s : \mathcal{N} \to \mathcal{N}$

Dette er de unære tall. I tillegg har vi en notasjon $exy = 2^x + y$ gitt ved

$$e0y = sy \ ( \ = 2^0 + y)$$
$$esxy = exexy \ ( \ = 2^x + 2^x + y)$$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$
- $3 = e11 = ee00e00$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$
- $3 = e11 = ee00e00$
- $4 = e20 = eee0000$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$
- $3 = e11 = ee00e00$
- $4 = e20 = eee0000$
- $16 = e40 = eeee00000 = sssssssssssssss0$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$
- $3 = e11 = ee00e00$
- $4 = e20 = eee0000$
- $16 = e40 = eeee00000 = sssssssssssssss0$
- $256 = 2^{16} = eeeee000000$

# Notasjonssystem

Med $\mathcal{N}$ og 0 og $sx$ har vi definert den aller enkleste uendelige datastrukturen.

Med $exy$ får vi definert et flott notasjonssystem. Med det får vi lagd korte beskrivelser av store tall

- $1 = s0 = e00$
- $2 = ss0 = e10 = ee000$
- $3 = e11 = ee00e00$
- $4 = e20 = eee0000$
- $16 = e40 = eeee00000 = sssssssssssssss0$
- $256 = 2^{16} = eeeee000000$
- $2^{256} = eeeeee0000000$ atomer i universet

# Problem

Hvorfor er *eeeeee*0000000 et tall?

# Problem

Hvorfor er *eeeeee*0000000 et tall?

Hvordan kan vi vise det?

# Problem

Hvorfor er *eeeeee*0000000 et tall?

Hvordan kan vi vise det?

Kan vi vise det mekanisk?

# Aksiomer

# Aksiomer

DATASTRUKTUR

# Aksiomer

DATASTRUKTUR

$$0 : \mathcal{N} \tag{1}$$

$$x : \mathcal{N} \rightarrow sx : \mathcal{N} \tag{2}$$

# Aksiomer

DATASTRUKTUR

$$0 : \mathcal{N} \tag{1}$$

$$x : \mathcal{N} \rightarrow sx : \mathcal{N} \tag{2}$$

NOTASJON

# Aksiomer

DATASTRUKTUR

$$0 : \mathcal{N} \tag{1}$$

$$x : \mathcal{N} \rightarrow sx : \mathcal{N} \tag{2}$$

NOTASJON

$$e0y = sy \tag{3}$$

$$esxy = exexy \tag{4}$$

# Aksiomer

DATASTRUKTUR

$$0 : \mathcal{N} \tag{1}$$
$$x : \mathcal{N} \to sx : \mathcal{N} \tag{2}$$

NOTASJON

$$e0y = sy \tag{3}$$
$$esxy = exexy \tag{4}$$

Kan vi vise

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \to eeeeee0000000 : \mathcal{N}$$

# Dårlig strategi

- Bruk DATASTRUKTUR til å telle opp til tallet

# Dårlig strategi

- Bruk DATASTRUKTUR til å telle opp til tallet
- Deretter NOTASJON til å forenkle svaret

# Dårlig strategi

- Bruk DATASTRUKTUR til å telle opp til tallet
- Deretter NOTASJON til å forenkle svaret

Trenger da bevis som er større enn universet.

# Dårlig strategi

- Bruk DATASTRUKTUR til å telle opp til tallet
- Deretter NOTASJON til å forenkle svaret

Trenger da bevis som er større enn universet.

Mekaniske bevisere bruker denne dårlige strategien.

# Hjelpepredikat

$\mathcal{N}_i$ definert ved

$$\mathcal{N}_0 = \mathcal{N} \tag{5}$$

$$x : \mathcal{N}_{k+1} = \forall y : \mathcal{N}_k . exy : \mathcal{N}_k \tag{6}$$

# Hva betyr hjelpepredikatet?

$$0 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^0 : \mathcal{N}$$
$$1 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^1 : \mathcal{N}$$
$$2 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^2 : \mathcal{N}$$
$$3 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^3 : \mathcal{N}$$
$$\ldots$$
$$0 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^0 : \mathcal{N}_1$$
$$1 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^1 : \mathcal{N}_1$$
$$2 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^2 : \mathcal{N}_1$$
$$3 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^3 : \mathcal{N}_1$$
$$\ldots$$

# Hva betyr hjelpepredikatet?

$$0 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^0 : \mathcal{N}$$
$$1 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^1 : \mathcal{N}$$
$$2 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^2 : \mathcal{N}$$
$$3 : \mathcal{N}_1 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}.x + 2^3 : \mathcal{N}$$
$$\dots$$
$$0 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^0 : \mathcal{N}_1$$
$$1 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^1 : \mathcal{N}_1$$
$$2 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^2 : \mathcal{N}_1$$
$$3 : \mathcal{N}_2 \Leftrightarrow \forall x : \mathcal{N}_1.x + 2^3 : \mathcal{N}_1$$
$$\dots$$

Hver linje — 2 ganger linja over

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.
Skal vise: $\forall x : \mathcal{N}_{i+1}.sx : \mathcal{N}_{i+1}$

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.
Skal vise: $\forall x : \mathcal{N}_{i+1}.sx : \mathcal{N}_{i+1}$
Anta: $a : \mathcal{N}_{i+1}$ dvs $\forall u : \mathcal{N}_i.eau : \mathcal{N}_i$

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.
Skal vise: $\forall x : \mathcal{N}_{i+1}.sx : \mathcal{N}_{i+1}$
Anta: $a : \mathcal{N}_{i+1}$ dvs $\forall u : \mathcal{N}_i.eau : \mathcal{N}_i$
Anta: $b : \mathcal{N}_i$.

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.
Skal vise: $\forall x : \mathcal{N}_{i+1}.sx : \mathcal{N}_{i+1}$
Anta: $a : \mathcal{N}_{i+1}$ dvs $\forall u : \mathcal{N}_i.eau : \mathcal{N}_i$
Anta: $b : \mathcal{N}_i$.
Men da $eab : \mathcal{N}_i$ og $esab = eaeab : \mathcal{N}_i$ ved å bruke $a : \mathcal{N}_{i+1}$ to ganger.

# Hjelpesetning

## Lemma

$$\text{DATASTRUKTUR} \wedge \text{NOTASJON} \rightarrow 0 : \mathcal{N}_i$$

Opplagt for $i = 0$ og $i = 1$. Vis for $i + 2$.
Skal vise: $\forall x : \mathcal{N}_{i+1}.sx : \mathcal{N}_{i+1}$
Anta: $a : \mathcal{N}_{i+1}$ dvs $\forall u : \mathcal{N}_i.eau : \mathcal{N}_i$
Anta: $b : \mathcal{N}_i$.
Men da $eab : \mathcal{N}_i$ og $esab = eaeab : \mathcal{N}_i$ ved å bruke $a : \mathcal{N}_{i+1}$ to ganger.
Dermed $sa : \mathcal{N}_{i+1}$ for enhver $a : \mathcal{N}_{i+1}$ og $0 : \mathcal{N}_{i+2}$

# God strategi

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_3$ gir $eee0000 : \mathcal{N}_3$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_3$ gir $eee0000 : \mathcal{N}_3$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_2$ gir $eeee00000 : \mathcal{N}_2$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_3$ gir $eee0000 : \mathcal{N}_3$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_2$ gir $eeee00000 : \mathcal{N}_2$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_1$ gir $eeeee000000 : \mathcal{N}_1$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_3$ gir $eee0000 : \mathcal{N}_3$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_2$ gir $eeee00000 : \mathcal{N}_2$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_1$ gir $eeeee000000 : \mathcal{N}_1$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_0$ gir $eeeeee0000000 : \mathcal{N}_0$

# God strategi

- $0 : \mathcal{N}_6$ og $0 : \mathcal{N}_5$ gir $e00 : \mathcal{N}_5$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_4$ gir $ee000 : \mathcal{N}_4$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_3$ gir $eee0000 : \mathcal{N}_3$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_2$ gir $eeee00000 : \mathcal{N}_2$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_1$ gir $eeeee000000 : \mathcal{N}_1$
- som sammen med $0 : \mathcal{N}_0$ gir $eeeeee0000000 : \mathcal{N}_0$
- som skulle vises

# Diskusjon

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet
- Andre notasjoner

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet
- Andre notasjoner
- Finne hjelpesetninger

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet
- Andre notasjoner
- Finne hjelpesetninger
- Hva er viktig i hjelpesetningene

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet
- Andre notasjoner
- Finne hjelpesetninger
- Hva er viktig i hjelpesetningene
- Hjelpesetninger til interaktive bevis

# Diskusjon

- Hvor godt er eksemplet?
- Bruk av likhet
- Andre notasjoner
- Finne hjelpesetninger
- Hva er viktig i hjelpesetningene
- Hjelpesetninger til interaktive bevis
- Andre datastrukturer

# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

$$0 = \ .$$

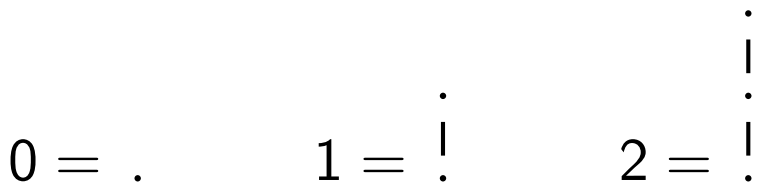
# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

$$0 = \ . \qquad\qquad 1 = \ \vdots$$

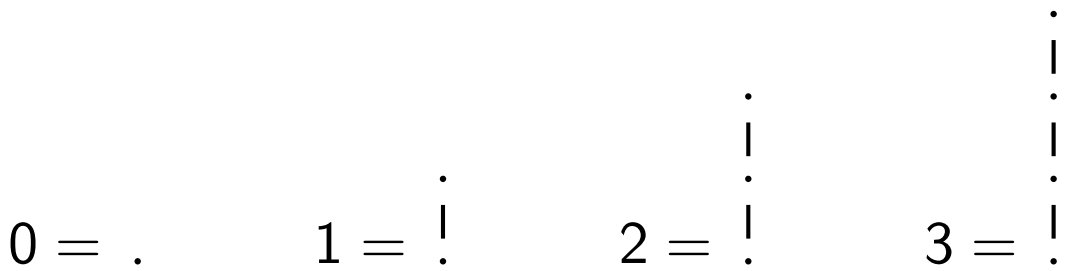
# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall



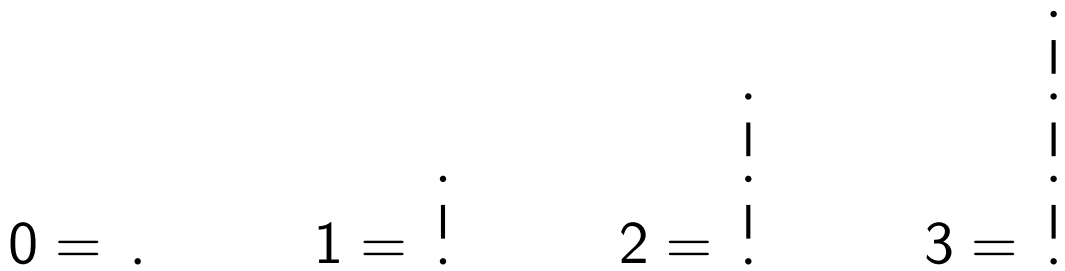
# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall



# Endelige trær

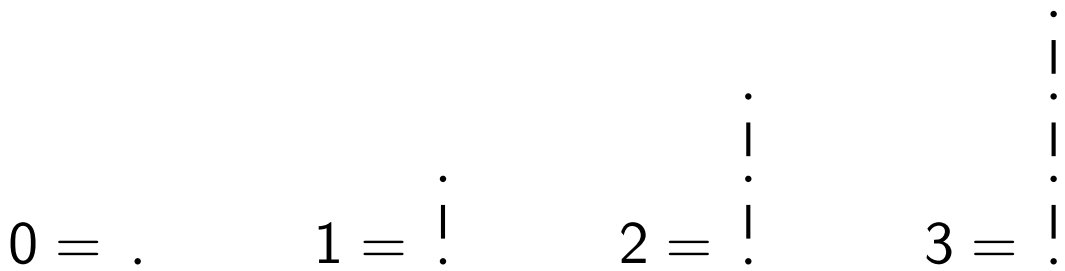
Vi kan representere naturlige tall




Og noen uendelige ordinaltall:

# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

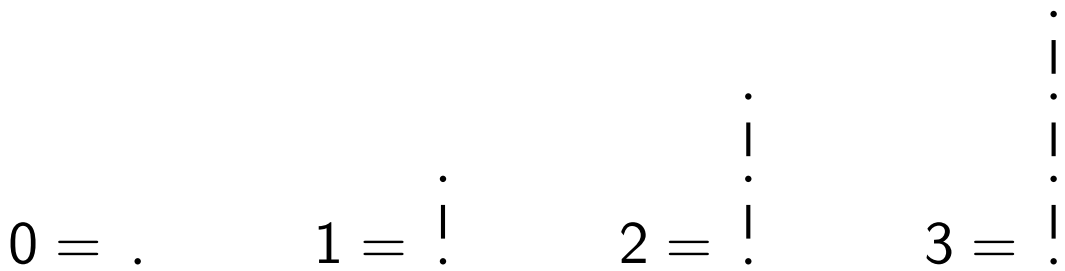



Og noen uendelige ordinaltall:

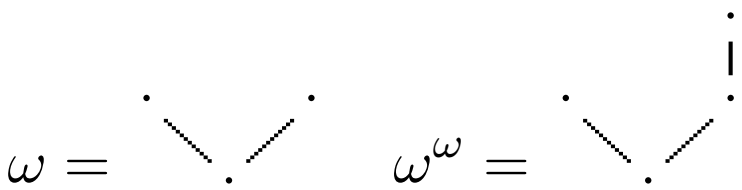


# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

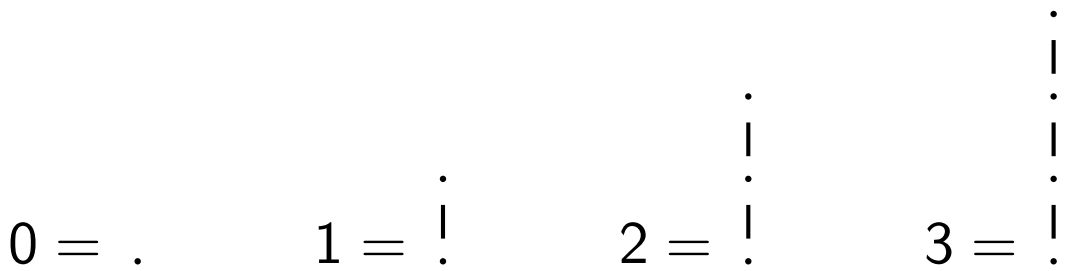



Og noen uendelige ordinaltall:

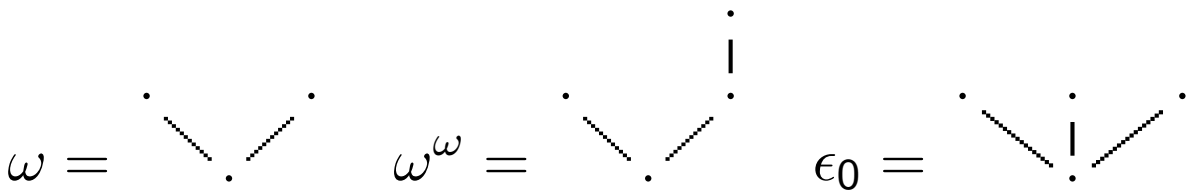


# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall

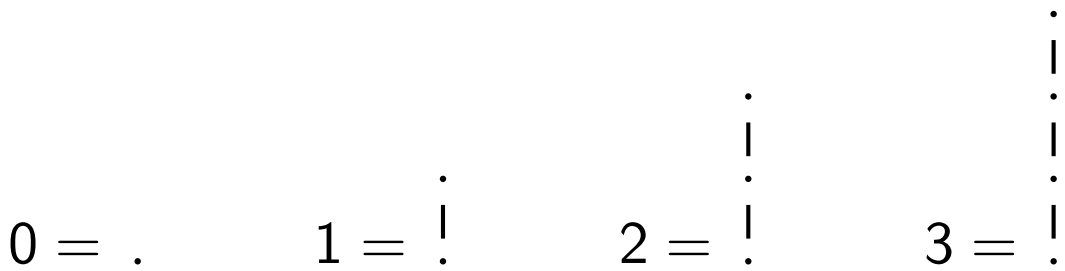



Og noen uendelige ordinaltall:

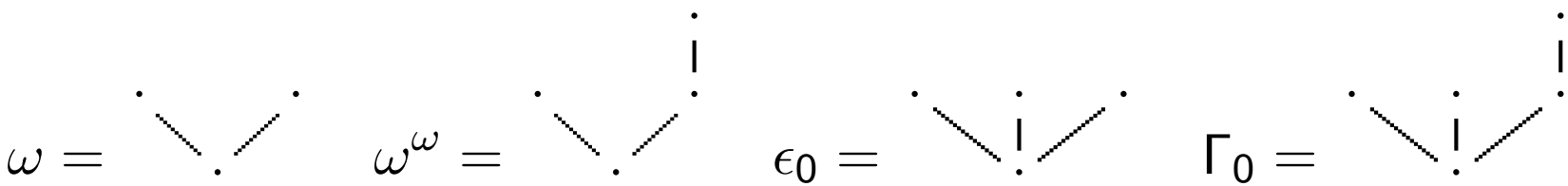


# Endelige trær

Vi kan representere naturlige tall




Og noen uendelige ordinaltall:




Trærne har rot og greinene er ordnet.

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær

# Ordne trærne

$$\boxed{\mathbf{A} < \mathbf{B} \;\Leftrightarrow\; \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \;\vee\; (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)}$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$

# Ordne trærne

$$\boxed{\mathbf{A} < \mathbf{B} \;\Leftrightarrow\; \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \;\vee\; (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)}$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$

# Ordne trærne

$$\boxed{\mathbf{A} < \mathbf{B} \;\Leftrightarrow\; \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \;\vee\; (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)}$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$

# Ordne trærne

$$\boxed{\mathbf{A} < \mathbf{B} \;\Leftrightarrow\; \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \;\vee\; (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)}$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle$

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle$

# Ordne trærne

$$\boxed{\mathbf{A} < \mathbf{B} \;\Leftrightarrow\; \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \;\vee\; (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)}$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle$ leksikografisk ordnet

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle$ leksikografisk ordnet
  - Lengden av følgene

# Ordne trærne

$$\mathbf{A} < \mathbf{B} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle \ \vee \ (\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B} \wedge \langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- $\langle \mathbf{A} \rangle$ — følgen av umiddelbare deltrær
- $\mathbf{A} \leq \langle \mathbf{B} \rangle$ $\mathbf{A} \leq$ for et umiddelbart deltre av $\mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \mathbf{B}$ for alle umiddelbare deltrær av $\mathbf{A}$ er $< \mathbf{B}$
- $\langle \mathbf{A} \rangle < \langle \mathbf{B} \rangle$ leksikografisk ordnet
  - Lengden av følgene
  - Ytterste høyre element der de er forskjellige

# Beskrive prosesser

# Beskrive prosesser

$\omega =$ 

# Beskrive prosesser

$$\omega = \ddots$$

Det minste tre større enn alle naturlige tall

# Beskrive prosesser

$$\omega = \ddots$$

Det minste tre større enn alle naturlige tall

$$\omega^\omega = \ddots^{\vdots}$$

# Beskrive prosesser

$$\omega = \ddots$$

Det minste tre større enn alle naturlige tall

$$\omega^\omega = \ddots^{\vdots}$$

Til å beskrive programmer med for-løkker

# Beskrive prosesser

$$\omega = \cdot^{\cdot^{\cdot}}$$

Det minste tre større enn alle naturlige tall

$$\omega^\omega = \cdot^{\cdot^{\vdots}}$$

Til å beskrive programmer med for-løkker

$$\epsilon_0 = \cdot^{\vdots^{\cdot}}$$

# Beskrive prosesser

$$\omega = \cdot^{\cdot^{\cdot}}$$

Det minste tre større enn alle naturlige tall

$$\omega^\omega = \cdot^{\cdot^{\vdots}}$$

Til å beskrive programmer med for-løkker

$$\epsilon_0 = \cdot^{\vdots^{\cdot}}$$

Gödels ufullstendighets teorem for elementær aritmetikk

FIN