Trær

IN2010 – Algoritmer og datastrukturer

Lars Tveito

Institutt for informatikk, Universitetet i Oslo
larstvei@ifi.uio.no

Trær

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som
  - en tom liste — ofte representert med `null` — eller

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som
  - en tom liste — ofte representert med `null` — eller
  - en node som består av en peker til et element og en peker til en liste

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som
  - en tom liste — ofte representert med `null` — eller
  - en node som består av en peker til et element og en peker til en liste
- Alle lister *er trær*, men ikke alle trær er lister

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som
  - en tom liste — ofte representert med `null` — eller
  - en node som består av en peker til et element og en peker til en liste
- Alle lister *er trær*, men ikke alle trær er lister
- Vi kan se på trær som en enkel utvidelse av lister

Trær

- Det er to store kategorier med anvendelser av trær:
  - Det du jobber med har en iboende hierarkisk struktur
  - Effektiv implementasjon for datasamlinger (eksempelvis mengder og ordbøker)
- Dere kjenner allerede til lister, som er definert som
  - en tom liste — ofte representert med `null` — eller
  - en node som består av en peker til et element og en peker til en liste
- Alle lister *er trær*, men ikke alle trær er lister
- Vi kan se på trær som en enkel utvidelse av lister
  - der vi tillater at en node har flere neste-pekere

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær
  - Så en nettside kan ses på som en bestemt måte å vise frem et tre

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær
  - Så en nettside kan ses på som en bestemt måte å vise frem et tre
  - (Dette treet kalles DOM-treet, der DOM står for Document Object Model)

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær
  - Så en nettside kan ses på som en bestemt måte å vise frem et tre
  - (Dette treet kalles DOM-treet, der DOM står for Document Object Model)
- En stamtavle (eller slektstre eller familietre) viser etterfølgerne til en person

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær
  - Så en nettside kan ses på som en bestemt måte å vise frem et tre
  - (Dette treet kalles DOM-treet, der DOM står for Document Object Model)
- En stamtavle (eller slektstre eller familietre) viser etterfølgerne til en person
- Filsystemer er trær

Trær – eksempler

- Syntaksen i programmeringspråk utgjør trær
  - Det første en kompilator gjør, er å gjøre koden din om til et *abstrakt syntakstre*
- HTML er et filformat som lar deg uttrykke trær
  - Så en nettside kan ses på som en bestemt måte å vise frem et tre
  - (Dette treet kalles DOM-treet, der DOM står for Document Object Model)
- En stamtavle (eller slektstre eller familietre) viser etterfølgerne til en person
- Filsystemer er trær
- Alle mulige sjakkpartier kan representeres som et (enormt) tre

Trær – definisjon

- Et tre er definert som

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler
    - Altså: fra en node v kan du ikke nå v ved å følge pekere fra v

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler
    - Altså: fra en node v kan du ikke nå v ved å følge pekere fra v
- Merk: Boka tillater ikke tomme trær

Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler
    - Altså: fra en node v kan du ikke nå v ved å følge pekere fra v
- Merk: Boka tillater ikke tomme trær
- Vi skal definere trær mer presist som en spesiell type grafer

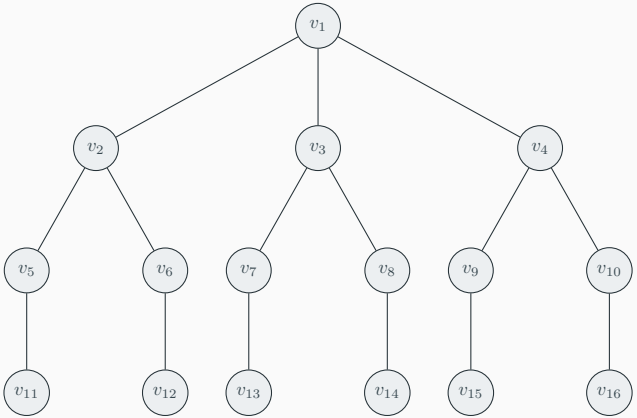
Trær – definisjon

- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler
    - Altså: fra en node v kan du ikke nå v ved å følge pekere fra v
- Merk: Boka tillater ikke tomme trær
- Vi skal definere trær mer presist som en spesiell type grafer
  - Da vil disse trærne kalles trær med *rot*

Trær – definisjon

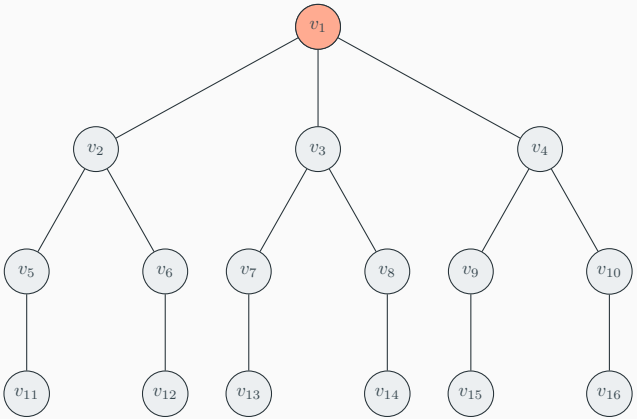
- Et tre er definert som
  - det tomme treet — ofte representert med `null` — eller
  - en node v med en peker til
    - et element
    - 0 eller flere pekere til barnenoder, og
    - nøyaktig én foreldernode (med mindre v er roten)
  - Et tre kan ikke inneholde sykler
    - Altså: fra en node v kan du ikke nå v ved å følge pekere fra v
- Merk: Boka tillater ikke tomme trær
- Vi skal definere trær mer presist som en spesiell type grafer
  - Da vil disse trærne kalles trær med *rot*
- En samling trær kalles en skog

Trær – terminologi



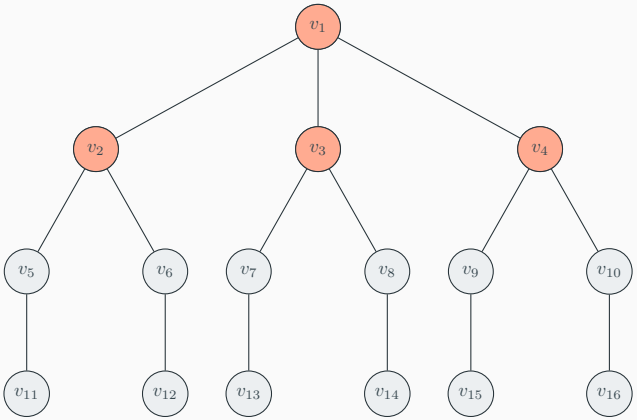
Dette er et tre, hver v_i er en node

Trær – terminologi



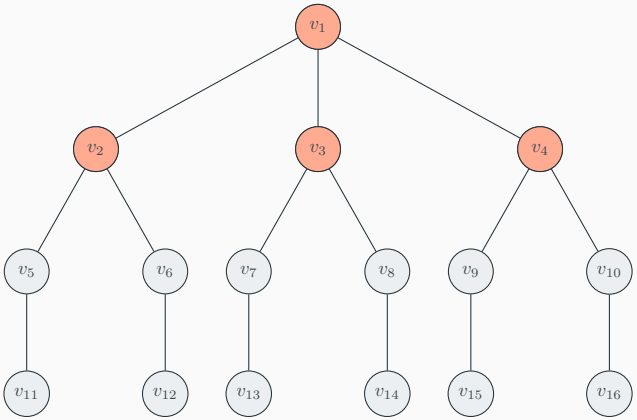
v_1 er *roten* av treet

Trær – terminologi



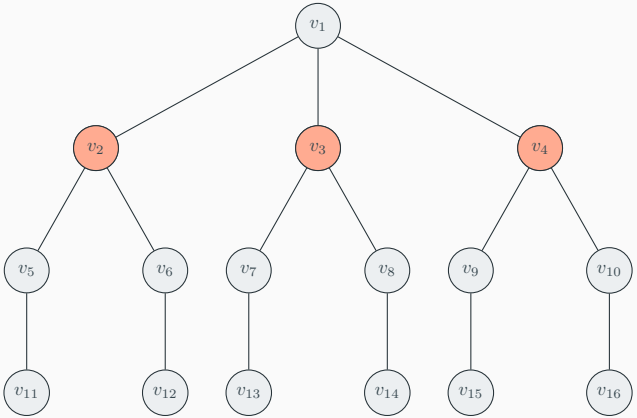
v_2, v_3 og v_4 er *barn* av v_1

Trær – terminologi



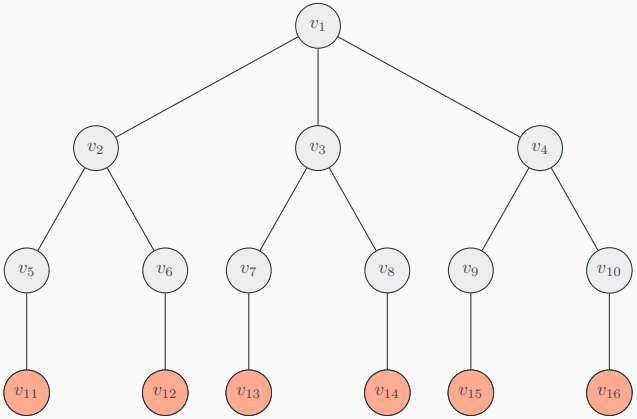
v_1 er *forelder* til v_2, v_3 og v_4

Trær – terminologi



v_2, v_3 og v_4 er *søsken*

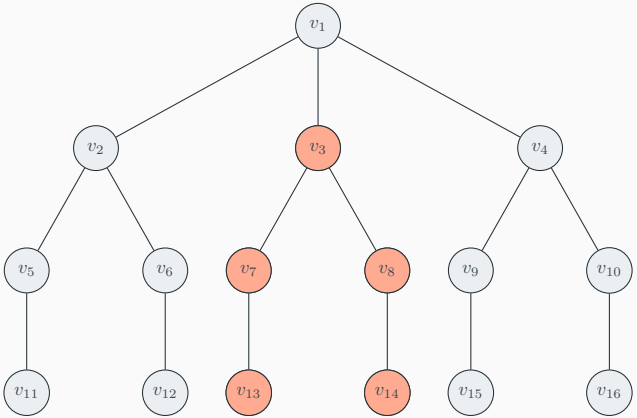
Trær – terminologi



$v_{11}, \ldots, v_{16}$ er *løvnoder*, eller *eksterne* noder

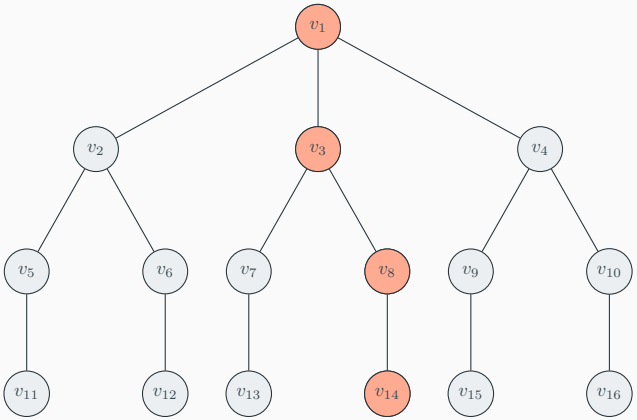
Nodene $v_1, \ldots, v_{10}$ er ikke løvnoder, eller *interne* noder

Trær – terminologi



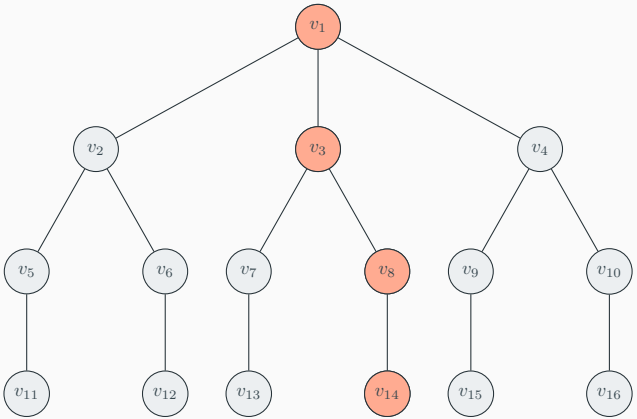
v_3, v_7, v_8, v_{13} og v_{14} utgjør et *subtre*, hvor v_3 er roten

Trær – terminologi



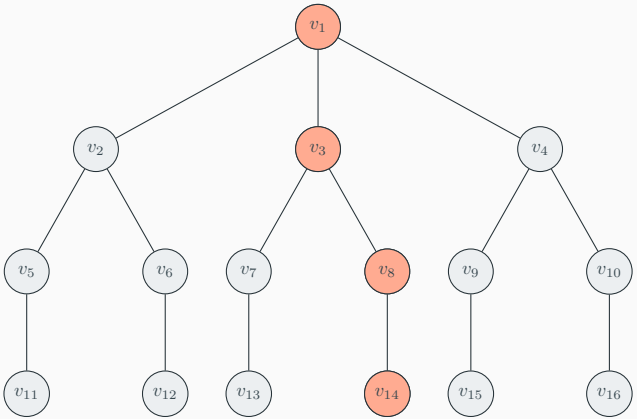
v_1, v_3, v_8 og v_{14} er *forfedre* av v_{14}

Trær – terminologi



v_1, v_3, v_8 og v_{14} er *etterkommere* av v_1

Trær – terminologi



Sekvensen v_1, v_3, v_8, v_{14} kalles en *sti*

Trær – Datastruktur

- `null` representerer et tomt tre

Trær – Datastruktur

- `null` representerer et tomt tre
- Anta at v er en node, da gir

Trær – Datastruktur

- `null` representerer et tomt tre
- Anta at v er en node, da gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden

Trær – Datastruktur

- `null` representerer et tomt tre
- Anta at v er en node, da gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden
  - v.`parent` foreldrenoden til v

Trær – Datastruktur

- `null` representerer et tomt tre
- Anta at v er en node, da gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden
  - v.`parent` foreldrenoden til v
  - v.`children` barnenodene til v

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

ALGORITHM: FINN DYBDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Dybden av noden

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

ALGORITHM: FINN DYBDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Dybden av noden

```
1 Procedure Depth(v)
```

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

ALGORITHM: FINN DYBDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Dybden av noden

```
1 Procedure Depth(v)
2     if v = null then
3         return −1
```

Trær – dybde

- Dybden til en node er én mer enn foreldrenoden
- Roten har dybde 0
- Siden vi tillater et tomt tre gir vi det dybde -1

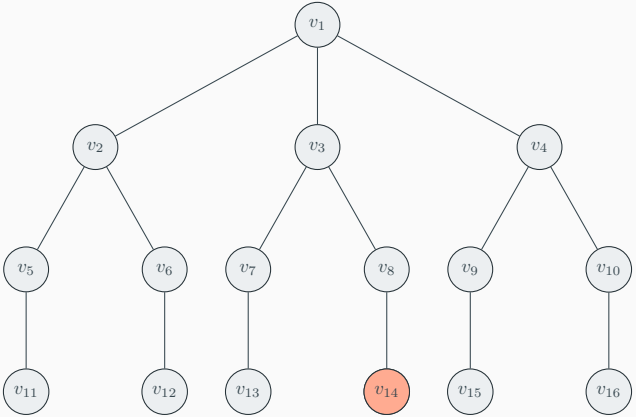
ALGORITHM: FINN DYBDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Dybden av noden

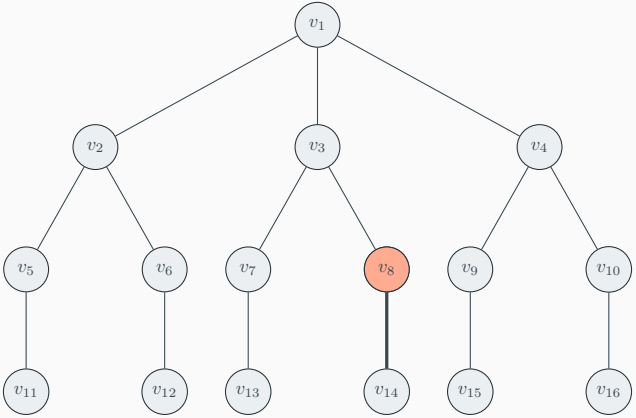
```
1 Procedure Depth(v)
2     if v = null then
3         return −1
4     return 1 + Depth(v.parent)
```

Trær – dybde (eksempel)

`Depth`(v_{14})

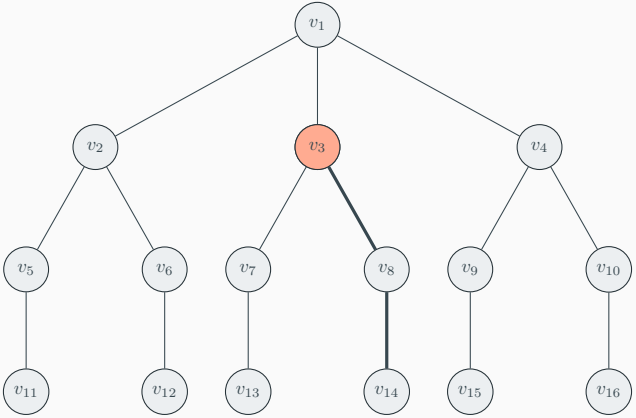


Trær – dybde (eksempel)



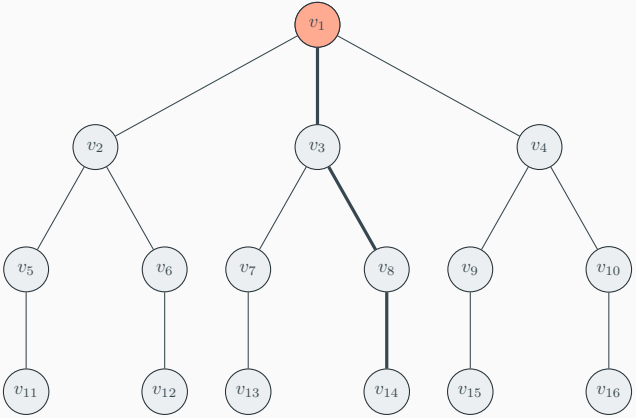
$$\texttt{Depth}(v_{14}) = (1 + \texttt{Depth}(v_8))$$

Trær – dybde (eksempel)



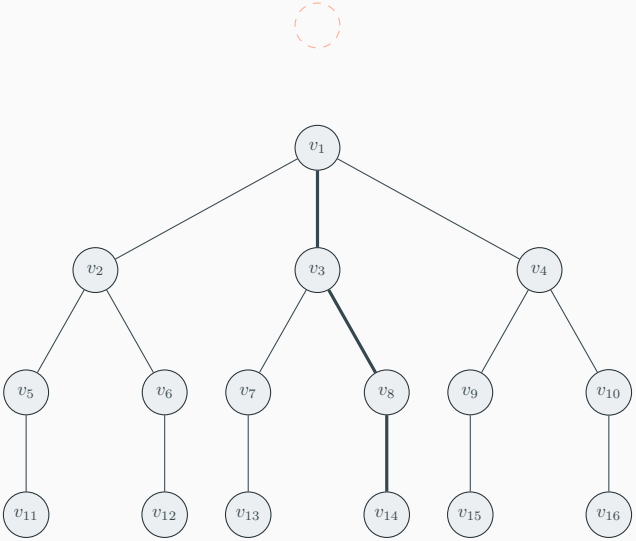
$$\begin{aligned}&\texttt{Depth}(v_{14})\\&= (1 + \texttt{Depth}(v_8))\\&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3)))\end{aligned}$$

Trær – dybde (eksempel)



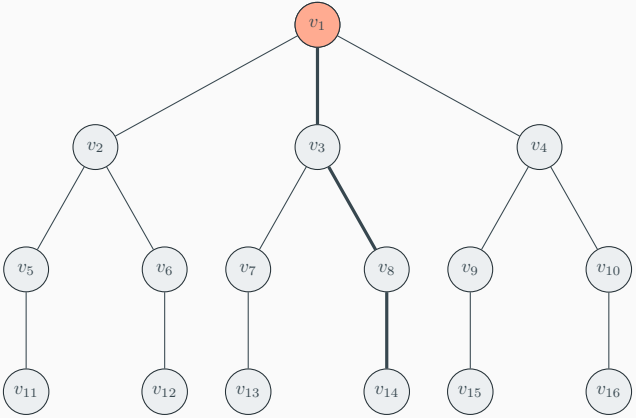
$$\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1))))
\end{aligned}$$

Trær – dybde (eksempel)



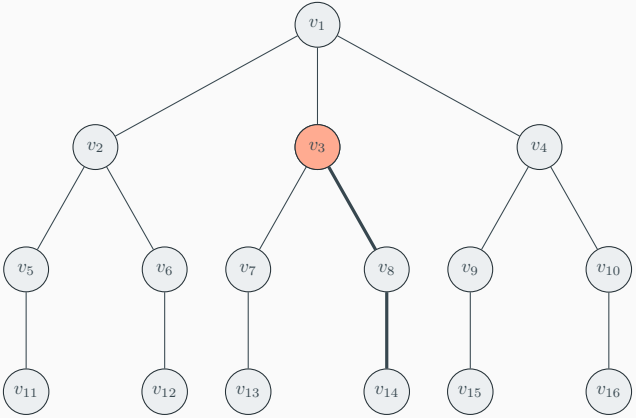
$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null})))))
\end{aligned}
$$

Trær – dybde (eksempel)



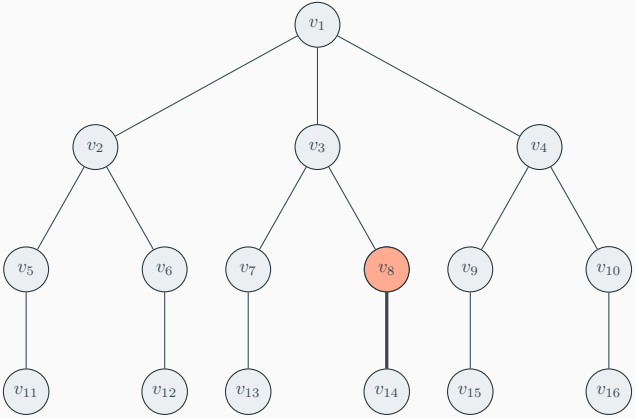
$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null}))))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + -1))))
\end{aligned}
$$

Trær – dybde (eksempel)



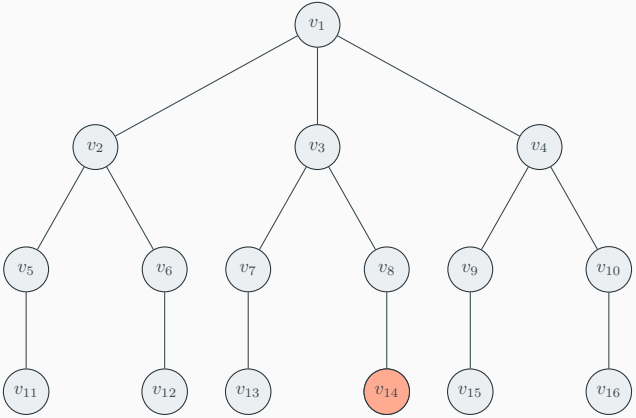
$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null}))))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + -1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + 0)))
\end{aligned}
$$

Trær – dybde (eksempel)



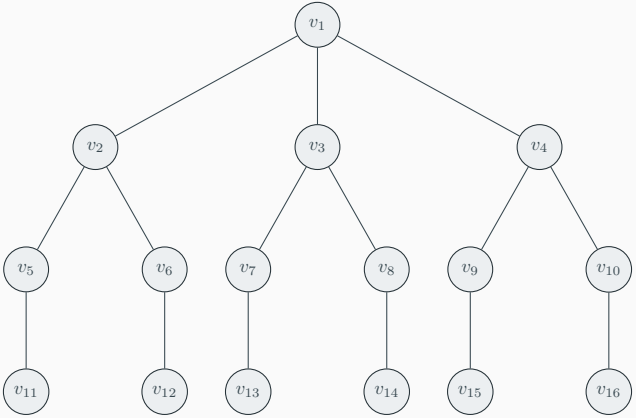
$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null}))))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + -1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + 0))) \\
&= (1 + (1 + 1))
\end{aligned}
$$

Trær – dybde (eksempel)



$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null}))))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + -1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + 0))) \\
&= (1 + (1 + 1)) \\
&= (1 + 2)
\end{aligned}
$$

Trær – dybde (eksempel)



$$
\begin{aligned}
&\texttt{Depth}(v_{14}) \\
&= (1 + \texttt{Depth}(v_8)) \\
&= (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_3))) \\
&= (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(v_1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + \texttt{Depth}(\textbf{null}))))) \\
&= (1 + (1 + (1 + (1 + -1)))) \\
&= (1 + (1 + (1 + 0))) \\
&= (1 + (1 + 1)) \\
&= (1 + 2) \\
&= 3
\end{aligned}
$$

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

ALGORITHM: FINN HØYDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Høyden av noden

```
1 Procedure height(v)
```

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

ALGORITHM: FINN HØYDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Høyden av noden

```
1 Procedure height(v)
2     h ← −1
3     if v = null then
4         return h
```

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

ALGORITHM: FINN HØYDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Høyden av noden

```
1 Procedure height(v)
2     h ← −1
3     if v = null then
4         return h
5     for c ∈ v.children do
6         h ← Max(h, height(c))
```

Trær – høyde

- Høyden av et tre er gitt av den høyeste avstanden til en etterkommer
- Det vil si dybden av den dypeste *løvnoden*

ALGORITHM: FINN HØYDEN AV EN GITT NODE

Input: En node v
Output: Høyden av noden

```
1 Procedure height(v)
2     h ← −1
3     if v = null then
4         return h
5     for c ∈ v.children do
6         h ← Max(h, height(c))
7     return 1 + h
```

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre
- For mange operasjoner har *rekkefølgen* vi utfører operasjonen i en betydning

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre
- For mange operasjoner har *rekkefølgen* vi utfører operasjonen i en betydning
  - *preorder* utfører operasjonen på seg selv først, og barna etterpå

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre
- For mange operasjoner har *rekkefølgen* vi utfører operasjonen i en betydning
  - *preorder* utfører operasjonen på seg selv først, og barna etterpå
  - *postorder* utfører operasjonen på barna først, og seg selv etterpå

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre
- For mange operasjoner har *rekkefølgen* vi utfører operasjonen i en betydning
  - *preorder* utfører operasjonen på seg selv først, og barna etterpå
  - *postorder* utfører operasjonen på barna først, og seg selv etterpå
- For å kopiere et tre egner *preorder* seg bedre enn *postorder*

Trær – traversering

- Vi har måter for å systematisk gå gjennom (traversere) et tre på
- Underveis har vi en operasjon vi ønsker å utføre
- For mange operasjoner har *rekkefølgen* vi utfører operasjonen i en betydning
  - *preorder* utfører operasjonen på seg selv først, og barna etterpå
  - *postorder* utfører operasjonen på barna først, og seg selv etterpå
- For å kopiere et tre egner *preorder* seg bedre enn *postorder*
- For å slette et tre kan egner *postorder* seg bedre enn *preorder*

Trær – preorder og postorder

ALGORITHM: PREORDER TRAVERSERING

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
```

Trær – preorder og postorder

Algorithm: Preorder traversering

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     Operate on v
```

Trær – preorder og postorder

Algorithm: Preorder traversering

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     Operate on v
5     for c ∈ v.children do
6         Preorder(c)
```

Trær – preorder og postorder

ALGORITHM: PREORDER TRAVERSERING

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     Operate on v
5     for c ∈ v.children do
6         Preorder(c)
```

ALGORITHM: POSTORDER TRAVERSERING

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på barna til v, deretter v

```
1 Procedure Postorder(v)
2     if v = null then
3         return
```

Trær – preorder og postorder

ALGORITHM: PREORDER TRAVERSERING

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     Operate on v
5     for c ∈ v.children do
6         Preorder(c)
```

ALGORITHM: POSTORDER TRAVERSERING

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på barna til v, deretter v

```
1 Procedure Postorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     for c ∈ v.children do
5         Postorder(c)
```

Trær – preorder og postorder

Algorithm: Preorder traversering

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på v, deretter barna til v

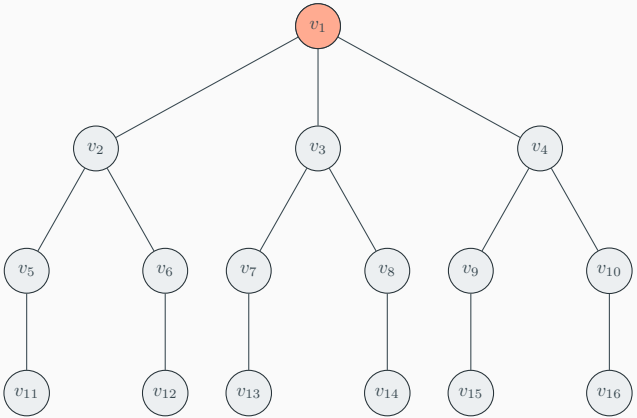
```
1 Procedure Preorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     Operate on v
5     for c ∈ v.children do
6         Preorder(c)
```

Algorithm: Postorder traversering

Input: En node v (som ikke er `null`)
Output: Utfør en operasjon på barna til v, deretter v

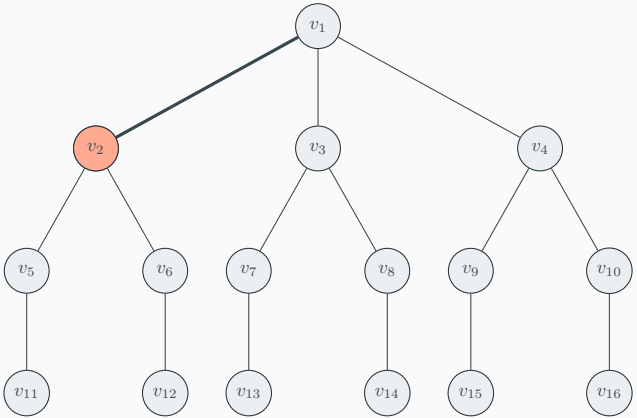
```
1 Procedure Postorder(v)
2     if v = null then
3         return
4     for c ∈ v.children do
5         Postorder(c)
6     Operate on v
```

Trær – preorder (eksempel)



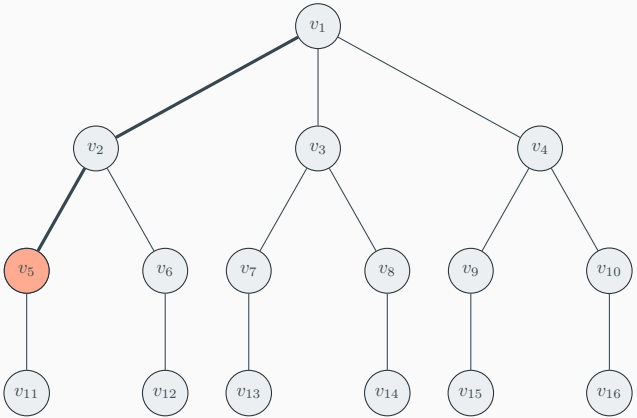
$v_1,$

Trær – preorder (eksempel)



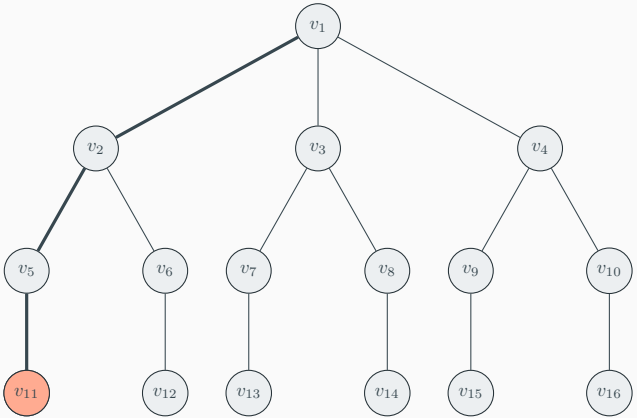
$v_1, v_2,$

Trær – preorder (eksempel)



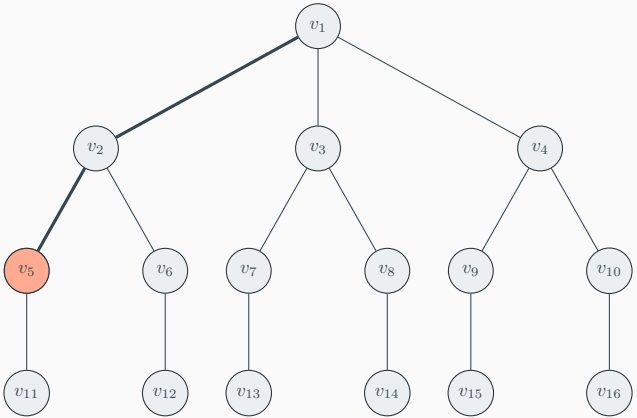
$v_1, v_2, v_5,$

Trær – preorder (eksempel)



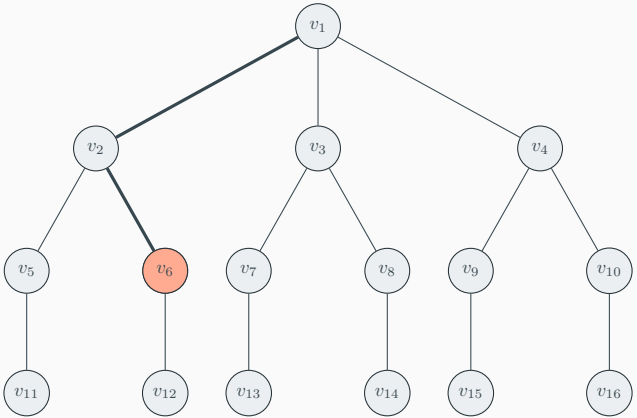
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$

Trær – preorder (eksempel)



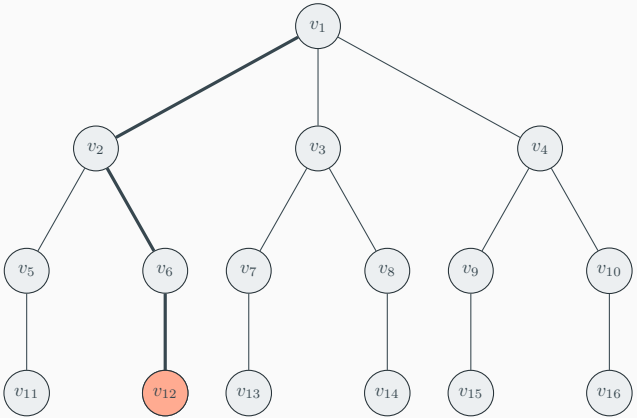
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$

Trær – preorder (eksempel)



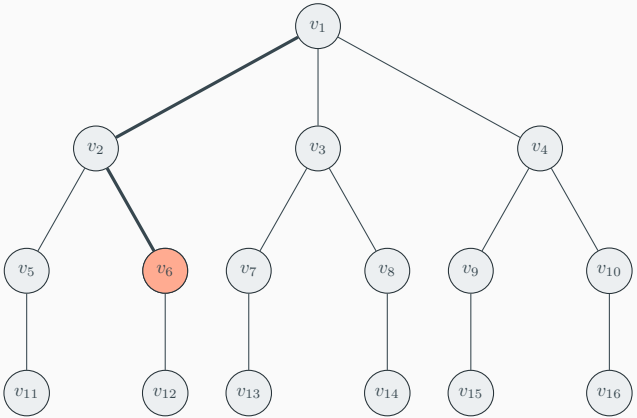
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6,$

Trær – preorder (eksempel)



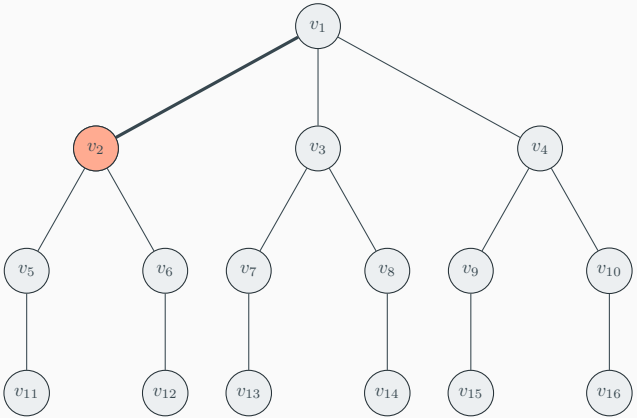
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$

Trær – preorder (eksempel)



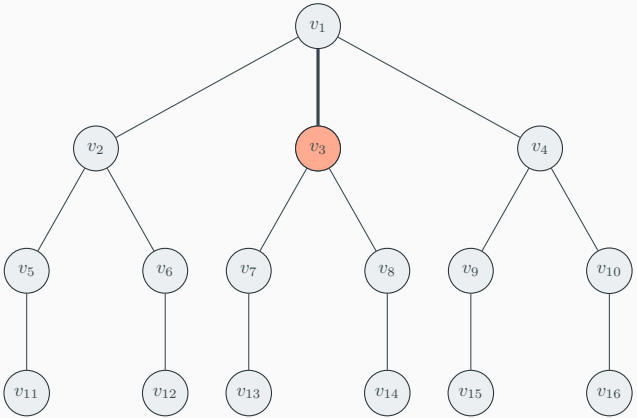
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$

Trær – preorder (eksempel)



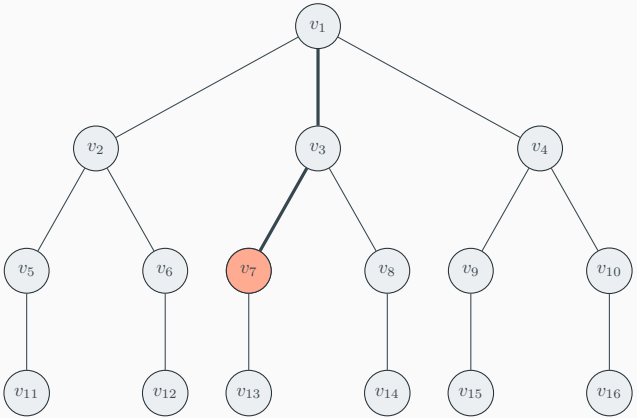
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$

Trær – preorder (eksempel)



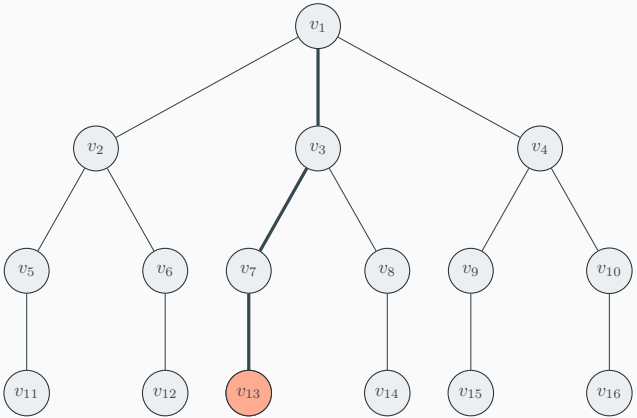
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3,$

Trær – preorder (eksempel)



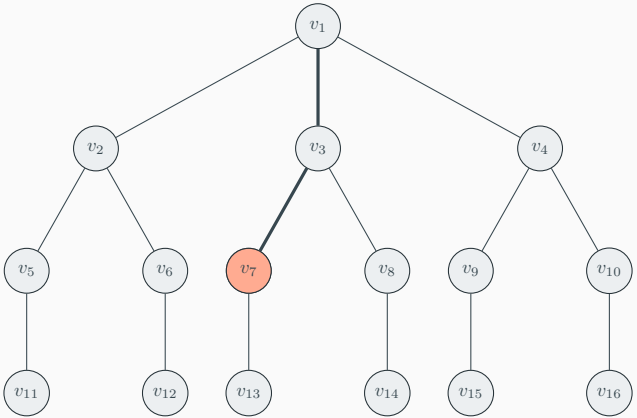
v_1, v_2, v_5, v_{11},
v_6, v_{12},
v_3, v_7,

Trær – preorder (eksempel)



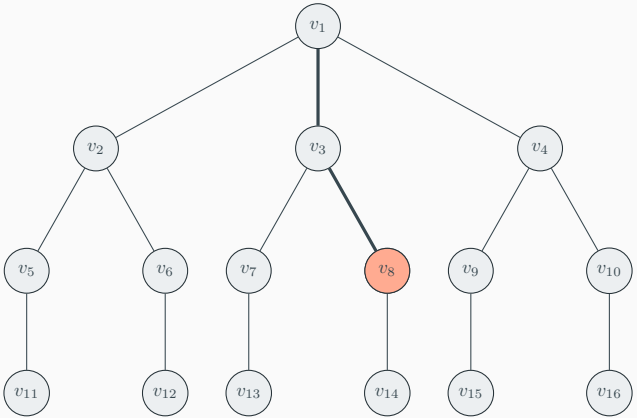
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$

Trær – preorder (eksempel)



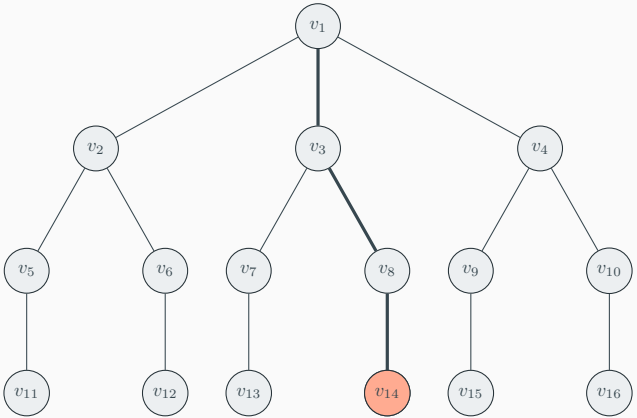
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$

Trær – preorder (eksempel)



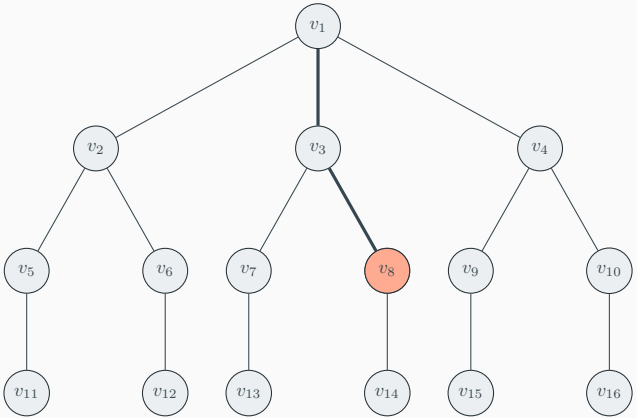
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8,$

Trær – preorder (eksempel)



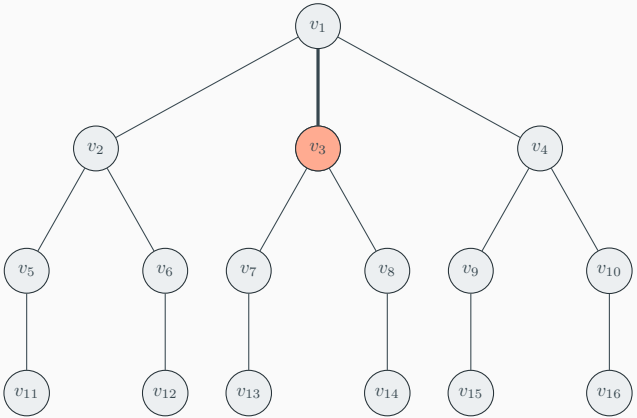
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$

Trær – preorder (eksempel)



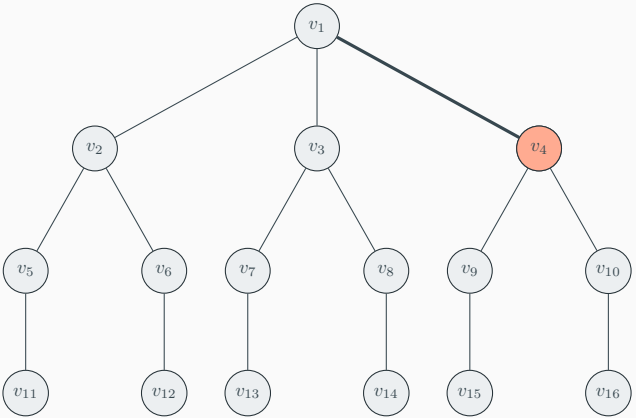
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$

Trær – preorder (eksempel)



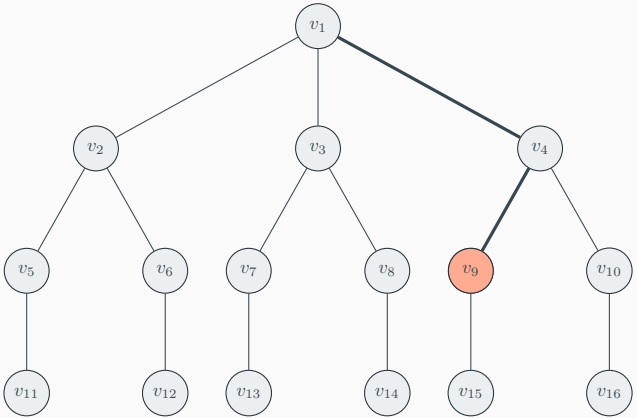
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$

Trær – preorder (eksempel)



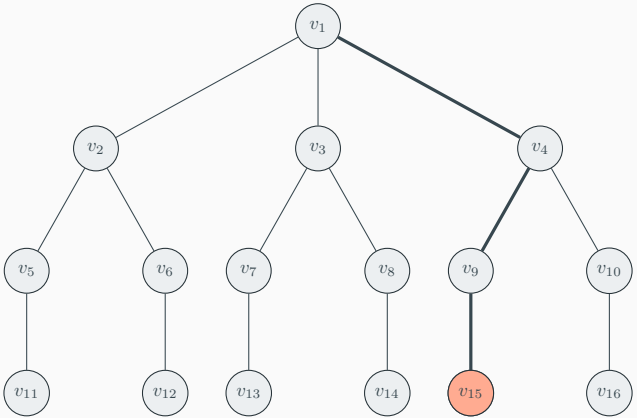
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4,$

Trær – preorder (eksempel)



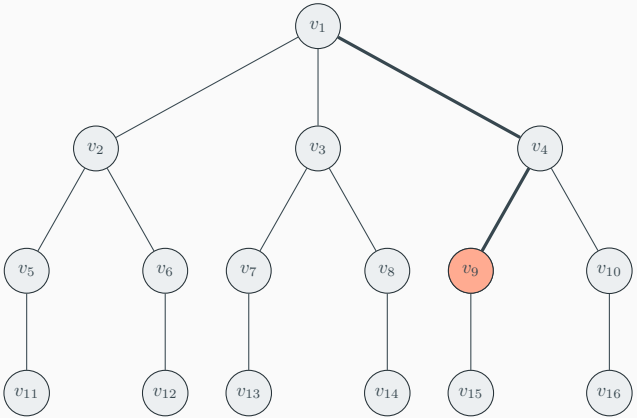
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9,$

Trær – preorder (eksempel)



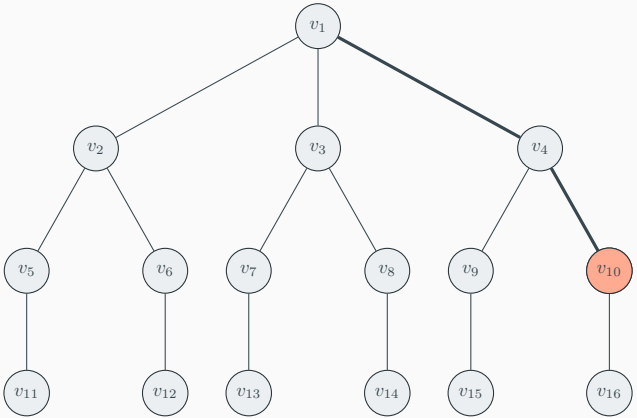
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$

Trær – preorder (eksempel)



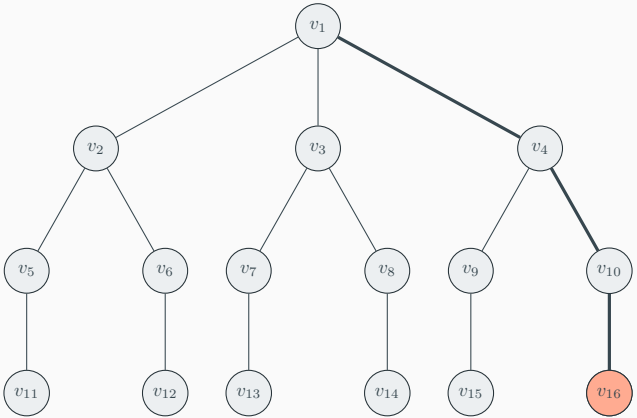
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$

Trær – preorder (eksempel)



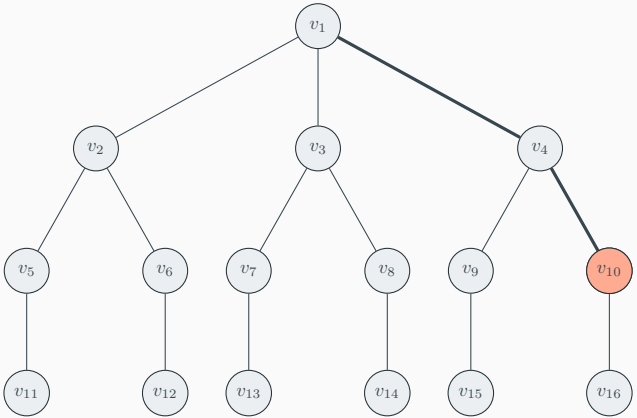
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
$v_{10},$

Trær – preorder (eksempel)



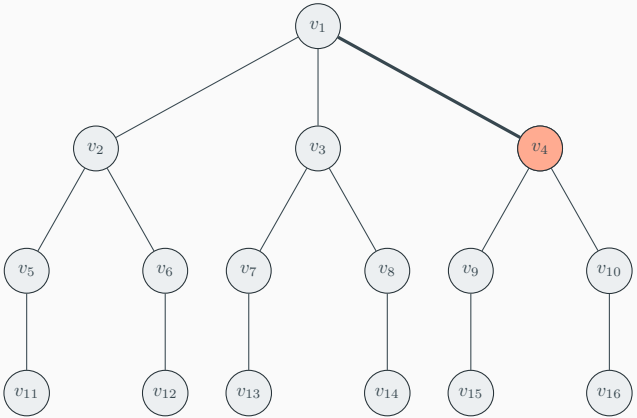
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
v_{10}, v_{16}

Trær – preorder (eksempel)



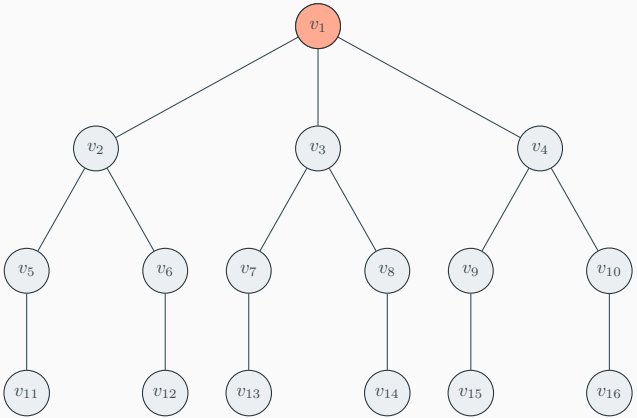
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
v_{10}, v_{16}

Trær – preorder (eksempel)



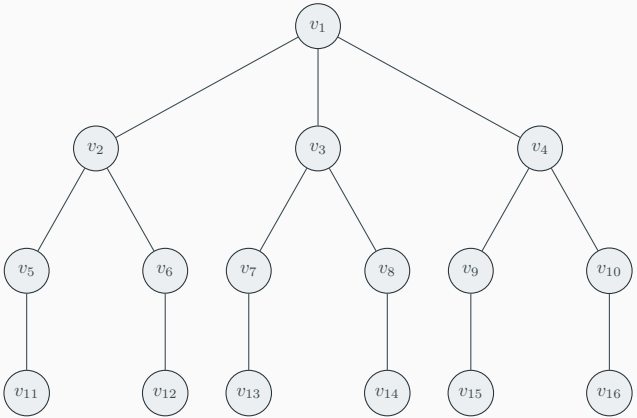
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
v_{10}, v_{16}

Trær – preorder (eksempel)



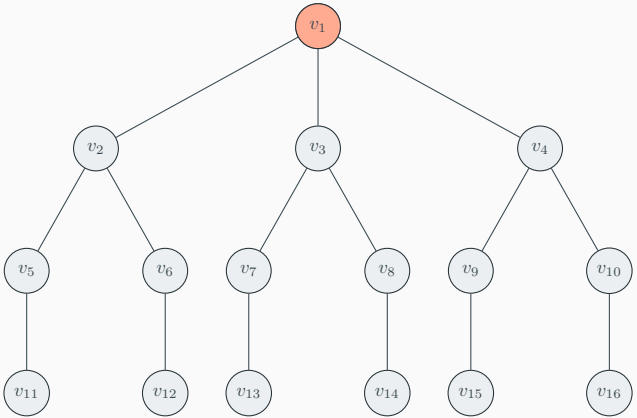
$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
v_{10}, v_{16}

Trær – preorder (eksempel)

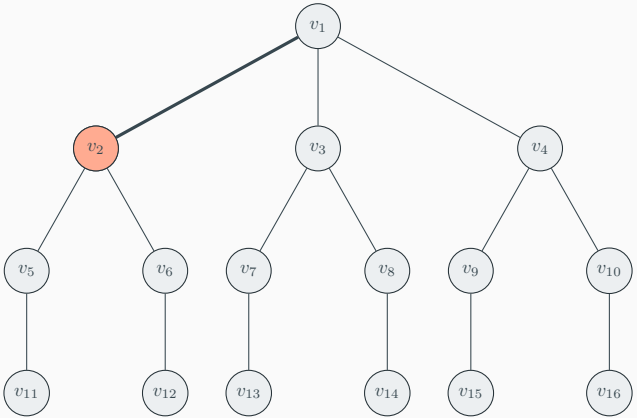


$v_1, v_2, v_5, v_{11},$
$v_6, v_{12},$
$v_3, v_7, v_{13},$
$v_8, v_{14},$
$v_4, v_9, v_{15},$
v_{10}, v_{16}

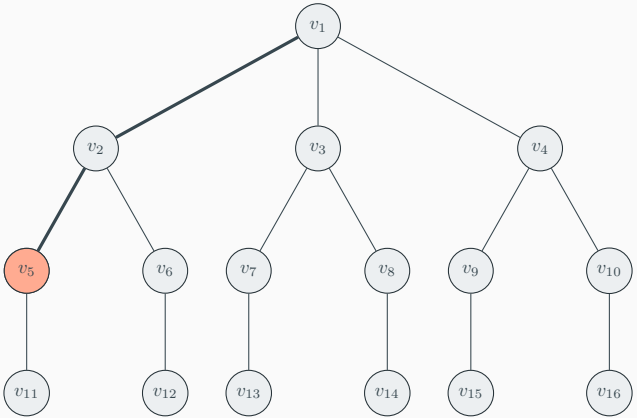
Trær – postorder (eksempel)



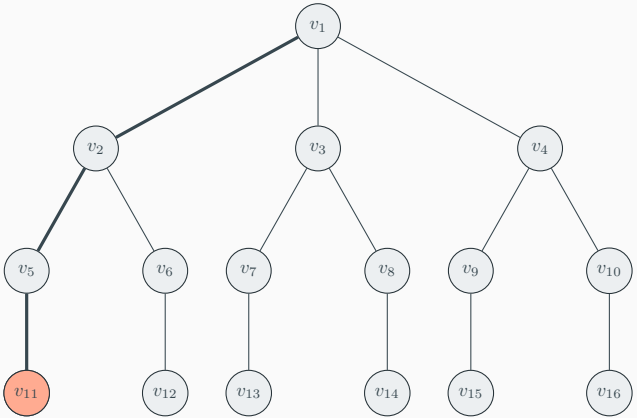
Trær – postorder (eksempel)



Trær – postorder (eksempel)

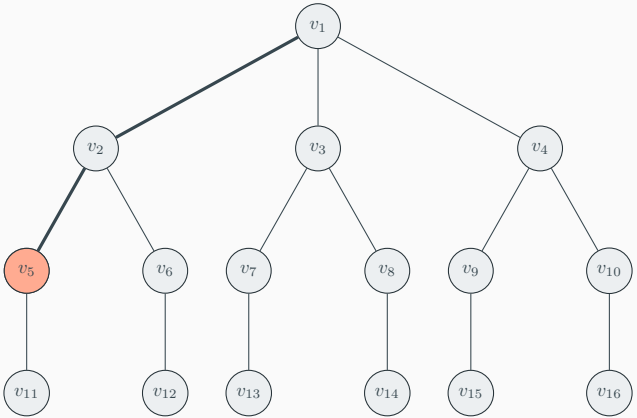


Trær – postorder (eksempel)



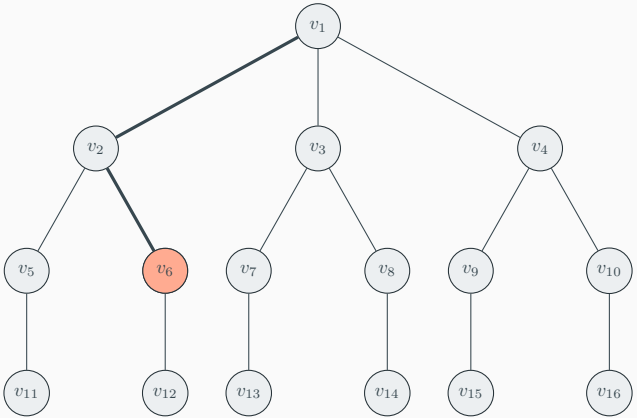
v_{11},

Trær – postorder (eksempel)



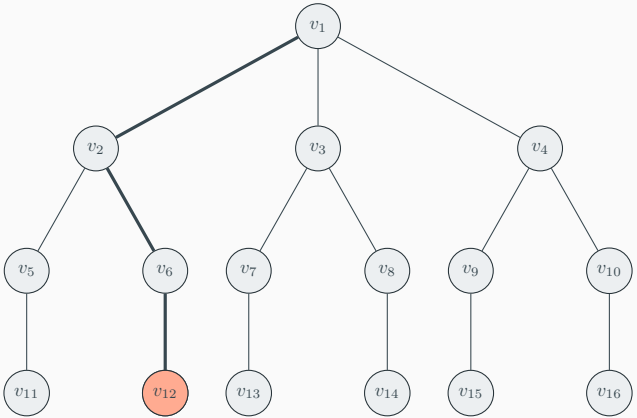
v_{11}, v_5,

Trær – postorder (eksempel)



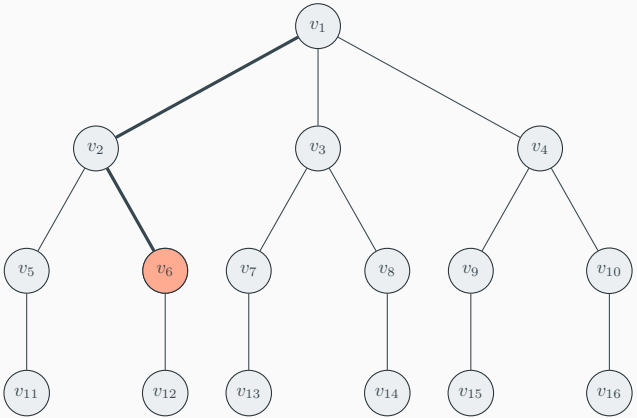
$v_{11}, v_5,$

Trær – postorder (eksempel)



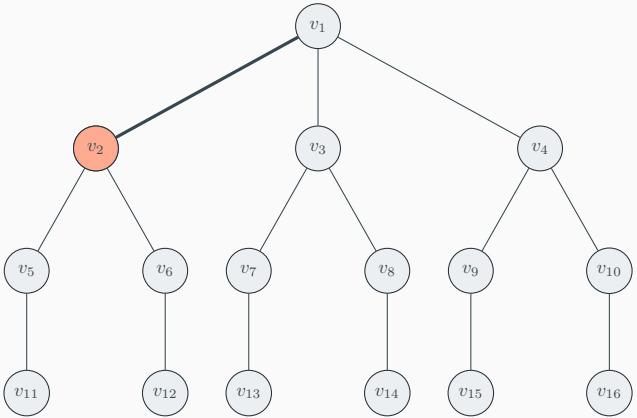
$v_{11}, v_5, v_{12},$

Trær – postorder (eksempel)



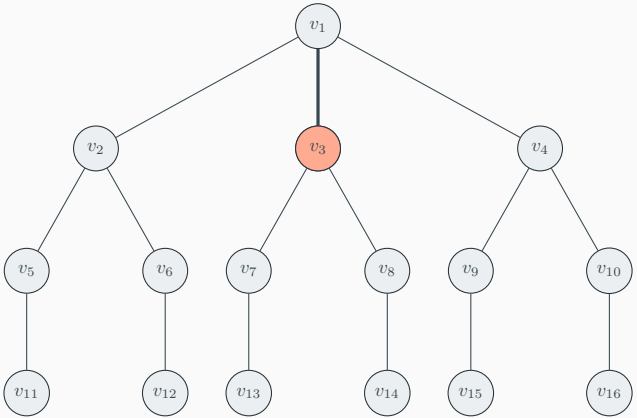
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6,$

Trær – postorder (eksempel)



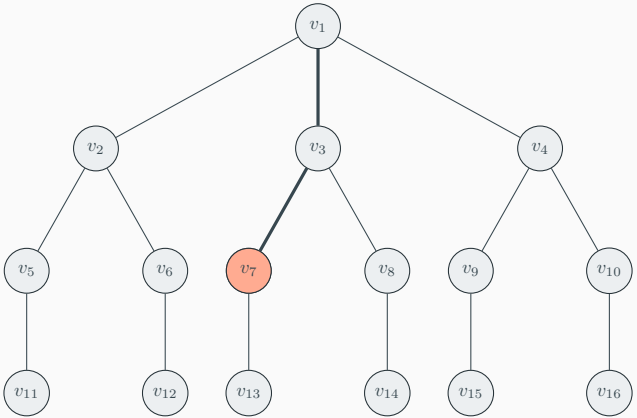
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$

Trær – postorder (eksempel)



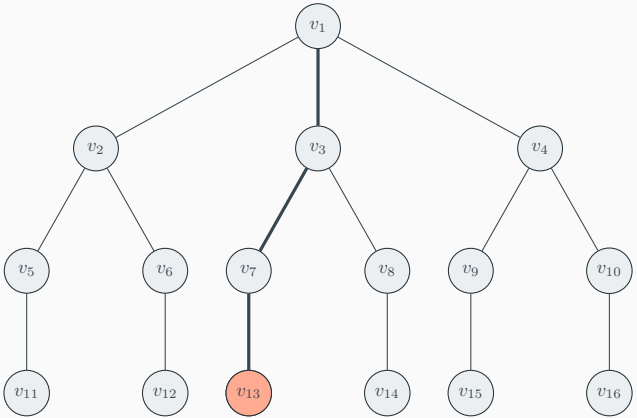
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$

Trær – postorder (eksempel)



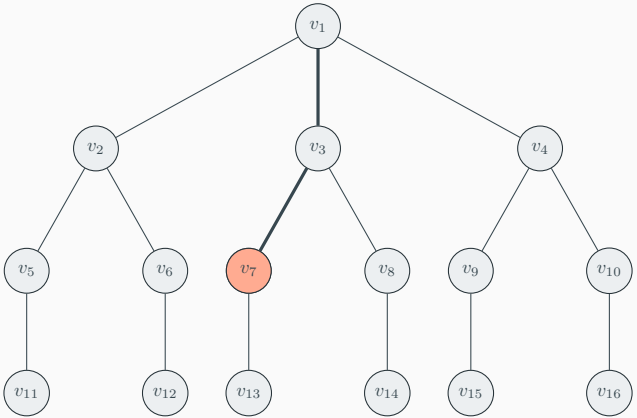
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$

Trær – postorder (eksempel)



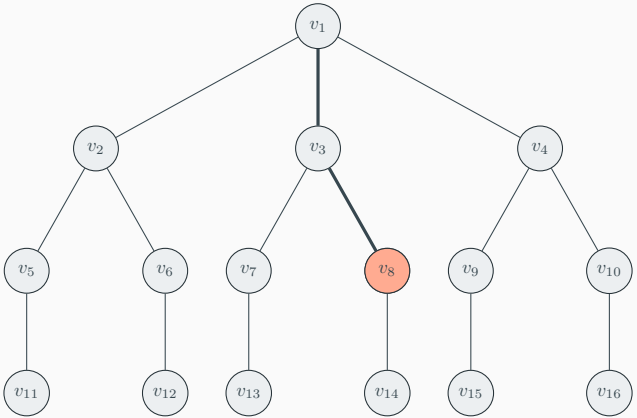
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13},$

Trær – postorder (eksempel)



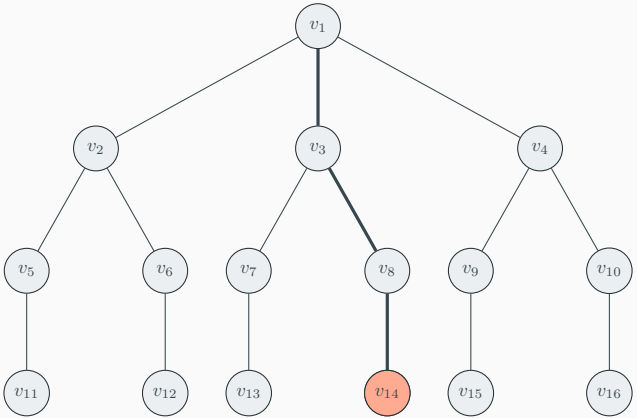
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7,$

Trær – postorder (eksempel)



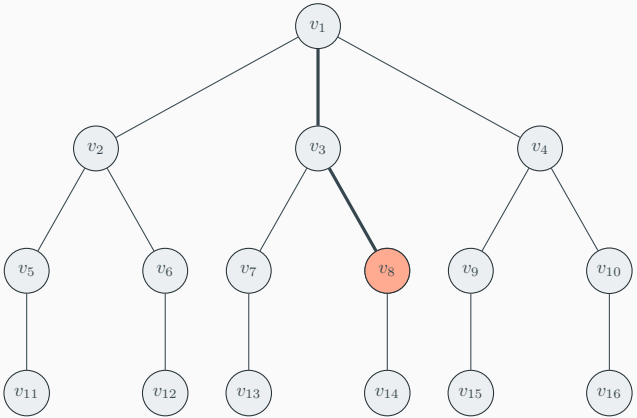
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7,$

Trær – postorder (eksempel)



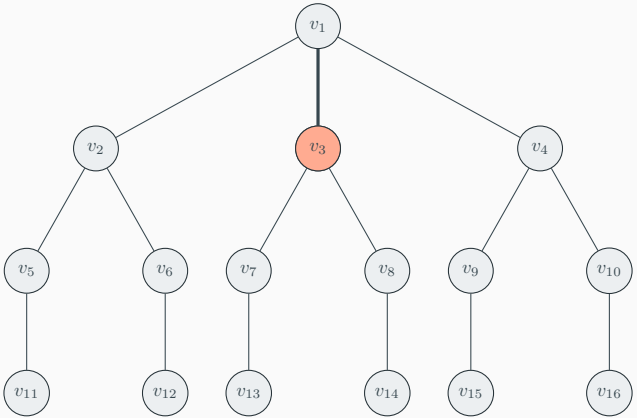
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14},$

Trær – postorder (eksempel)



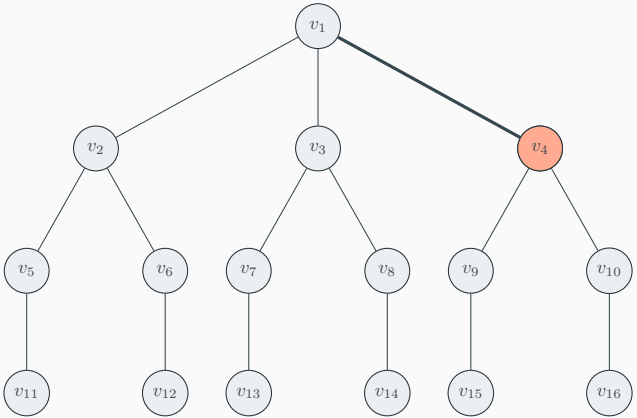
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8,$

Trær – postorder (eksempel)



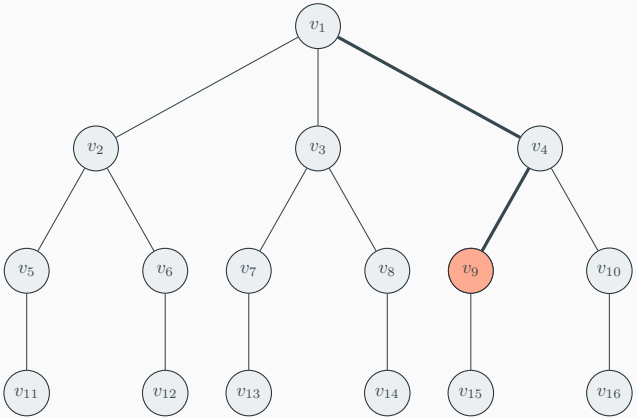
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$

Trær – postorder (eksempel)



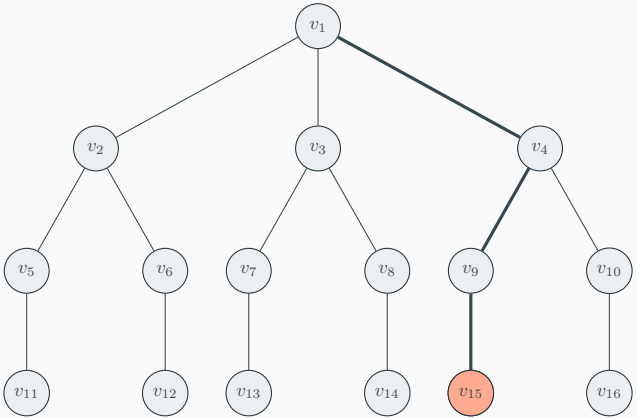
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$

Trær – postorder (eksempel)



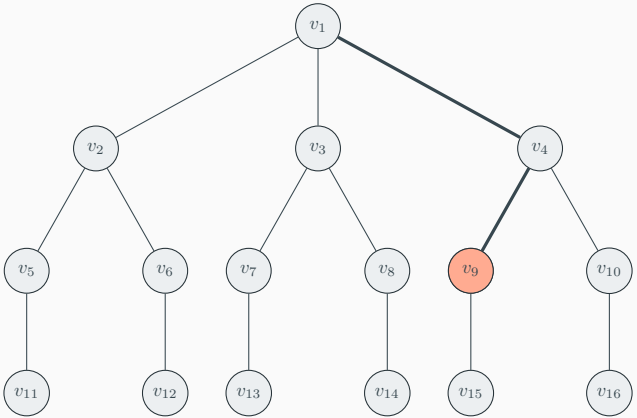
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$

Trær – postorder (eksempel)



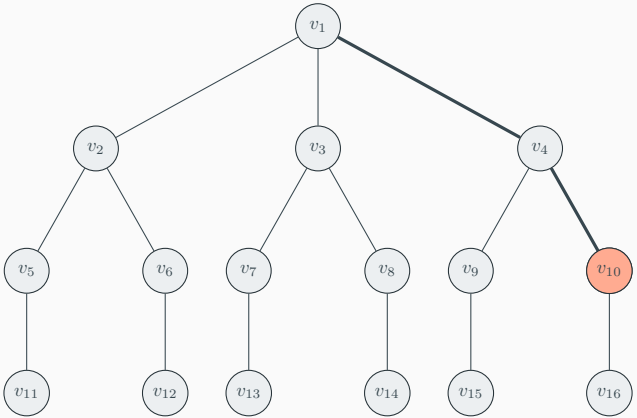
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15},$

Trær – postorder (eksempel)



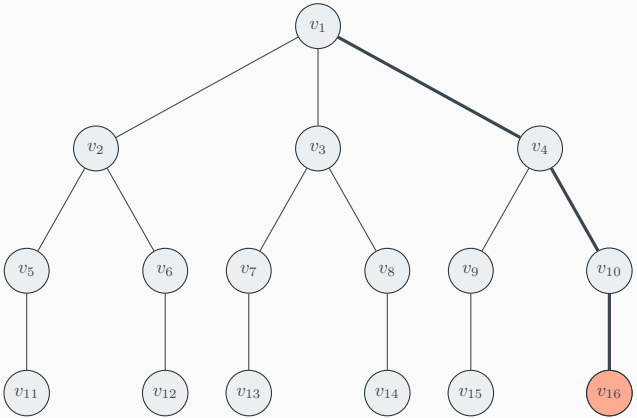
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9,$

Trær – postorder (eksempel)



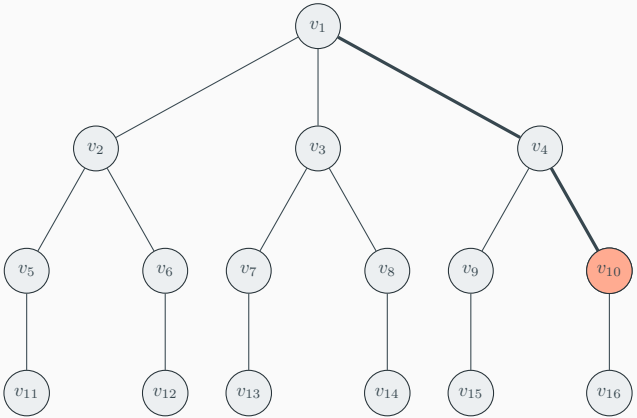
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9,$

Trær – postorder (eksempel)



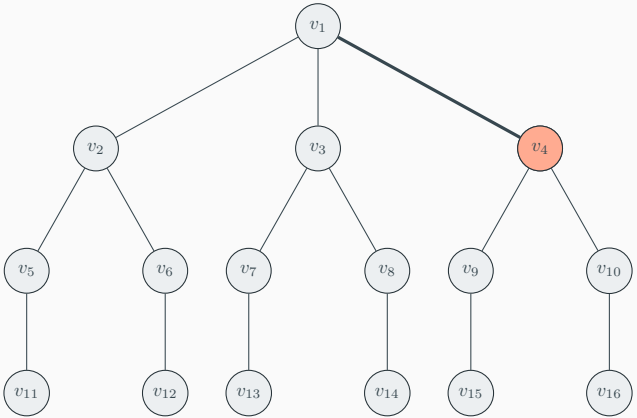
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9, v_{16},$

Trær – postorder (eksempel)



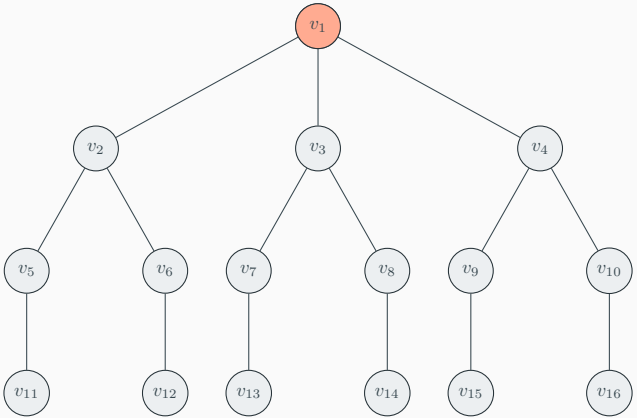
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9, v_{16}, v_{10},$

Trær – postorder (eksempel)



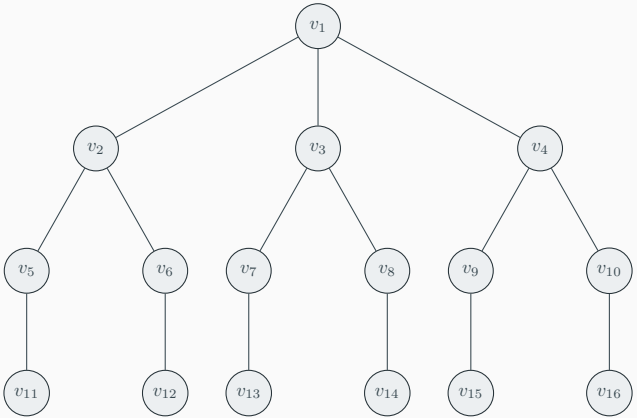
$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9, v_{16}, v_{10}, v_4,$

Trær – postorder (eksempel)



$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9, v_{16}, v_{10}, v_4,$
v_1

Trær – postorder (eksempel)



$v_{11}, v_5, v_{12}, v_6, v_2,$
$v_{13}, v_7, v_{14}, v_8, v_3,$
$v_{15}, v_9, v_{16}, v_{10}, v_4,$
v_1

Binære søketrær

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn
- I binære trær referer vi til *venstre* og *høyre* barn

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn
- I binære trær referer vi til *venstre* og *høyre* barn
- Hvis v er en node i et binærtre, så gir

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn
- I binære trær referer vi til *venstre* og *høyre* barn
- Hvis v er en node i et binærtre, så gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn
- I binære trær referer vi til *venstre* og *høyre* barn
- Hvis v er en node i et binærtre, så gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden
  - v.`left` venstre barn av v

Binære trær

- Et binærtre er et tre hvor hver node har maksimalt to barn
- I binære trær referer vi til *venstre* og *høyre* barn
- Hvis v er en node i et binærtre, så gir
  - v.`element` dataen som er lagret i noden
  - v.`left` venstre barn av v
  - v.`right` høyre barn av v

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er $v.\texttt{element}$

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er v.`element`
    - større enn alle elementer i venstre subtre, og

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er v.`element`
    - større enn alle elementer i venstre subtre, og
    - mindre enn alle elementer i høyre subtre

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er v.`element`
    - større enn alle elementer i venstre subtre, og
    - mindre enn alle elementer i høyre subtre
- Merk at vi kan si større *eller lik* dersom vi ønsker å tillate duplikater

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er v.`element`
    - større enn alle elementer i venstre subtre, og
    - mindre enn alle elementer i høyre subtre
- Merk at vi kan si større *eller lik* dersom vi ønsker å tillate duplikater
- For at vi skal kunne bruke binære søketrær må elementene være *sammenlignbare*

Binære søketrær

- Et binært søketre er et binærtre som oppfyller følgende egenskap
  - For hver node v så er v.`element`
    - større enn alle elementer i venstre subtre, og
    - mindre enn alle elementer i høyre subtre
- Merk at vi kan si større *eller lik* dersom vi ønsker å tillate duplikater
- For at vi skal kunne bruke binære søketrær må elementene være *sammenlignbare*
- Binære trær er spesielt gode når de er *balanserte*

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array
- Et problem oppstår når vi trenger en *dynamisk struktur*

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array
- Et problem oppstår når vi trenger en *dynamisk struktur*
  - En datastruktur hvor vi stadig legger til og fjerner elementer

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array
- Et problem oppstår når vi trenger en *dynamisk struktur*
  - En datastruktur hvor vi stadig legger til og fjerner elementer
- Et binært søketre er en datastruktur

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array
- Et problem oppstår når vi trenger en *dynamisk struktur*
  - En datastruktur hvor vi stadig legger til og fjerner elementer
- Et binært søketre er en datastruktur
  - som gjør binærsøk *enkelt*

Sammenheng mellom binærsøk og binære søketrær

- Idéen bak binærsøk er å *halvere søkerommet* hver gang vi gjør en sammenligning, som gir $\mathcal{O}(\log(n))$ tid på oppslag
- Det fungerer strålende, men det forutsetter at vi jobbber på et *sortert* array
- Et problem oppstår når vi trenger en *dynamisk struktur*
  - En datastruktur hvor vi stadig legger til og fjerner elementer
- Et binært søketre er en datastruktur
  - som gjør binærsøk *enkelt*
  - støtter effektiv innsetting og sletting

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

`Input:` En node v og et element x
`Output:` En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
```

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
```

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x

Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
```

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x

Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
```

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
8     return v
```

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
8     return v
```

- Denne algoritmen har kompleksitet $\mathcal{O}(h)$

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
8     return v
```

- Denne algoritmen har kompleksitet $\mathcal{O}(h)$
  - der h er høyden på treet

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
8     return v
```

- Denne algoritmen har kompleksitet $\mathcal{O}(h)$
  - der h er høyden på treet
- Dersom n er antall noder i treet har vi $\mathcal{O}(n)$ i verste tilfelle

Innsetting

ALGORITHM: INNSETTING I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: En oppdatert node v der en node som inneholder x er en etterkommer av v

```
1 Procedure Insert(v, x)
2     if v = null then
3         v ← new Node(x)
4     else if x < v.element then
5         v.left ← Insert(v.left, x)
6     else if x > v.element then
7         v.right ← Insert(v.right, x)
8     return v
```

- Denne algoritmen har kompleksitet $\mathcal{O}(h)$
  - der h er høyden på treet
- Dersom n er antall noder i treet har vi $\mathcal{O}(n)$ i verste tilfelle
  - men hvis treet er balansert, så er kompleksiteten $\mathcal{O}(\log(n))$

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

`Input:` En node v og et element x
`Output:` Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **`null`**.

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x

Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **null**.

```
1 Procedure Search(v, x)
```

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x

Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers `null`.

```
1 Procedure Search(v, x)
2     if v = null then
3         return null
```

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **null**.

```
1 Procedure Search(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if v.element = x then
5         return v
```

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **null**.

```
1 Procedure Search(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if v.element = x then
5         return v
6     if x < v.element then
7         return Search(v.left, x)
```

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **null**.

```
1 Procedure Search(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if v.element = x then
5         return v
6     if x < v.element then
7         return Search(v.left, x)
8     if x > v.element then
9         return Search(v.right, x)
```

Oppslag

ALGORITHM: OPPSLAG I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, returner u, ellers **null**.

```
1 Procedure Search(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if v.element = x then
5         return v
6     if x < v.element then
7         return Search(v.left, x)
8     if x > v.element then
9         return Search(v.right, x)
```

- Oppslag i et binærtre har samme kompleksitet som innsetting

Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag

Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!

Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!
- Vi må passe på å tette eventuelle «hull»

Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!
- Vi må passe på å tette eventuelle «hull»
- Vi skiller mellom tre tilfeller

Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!
- Vi må passe på å tette eventuelle «hull»
- Vi skiller mellom tre tilfeller
  - Noden vi vil slette har ingen barn

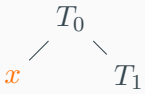
Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!
- Vi må passe på å tette eventuelle «hull»
- Vi skiller mellom tre tilfeller
  - Noden vi vil slette har ingen barn
  - Noden vi vil slette har ett barn

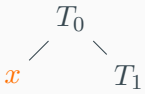
Sletting

- Sletting fra et binærtre er litt vanskeligere enn innsetting og oppslag
  - men har samme kompleksitet!
- Vi må passe på å tette eventuelle «hull»
- Vi skiller mellom tre tilfeller
  - Noden vi vil slette har ingen barn
  - Noden vi vil slette har ett barn
  - Noden vi vil slette har to barn

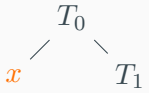
Sletting – ingen barn



Sletting – ingen barn

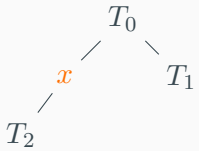


Sletting – ingen barn

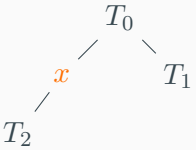


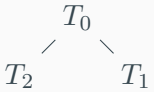
- Når det ikke er noen barn er det tilstrekkelig å fjerne pekeren til x

Sletting – ett barn (venstre)



Sletting – ett barn (venstre)

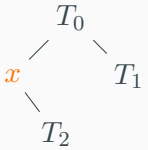




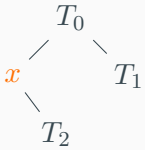
Sletting – ett barn (venstre)

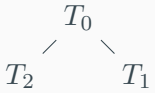
- Når noden har ett barn på venstre side, erstatt x med T_2

Sletting – ett barn (høyre)

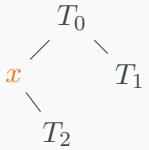


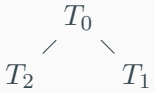
Sletting – ett barn (høyre)





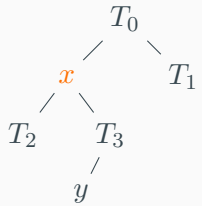
Sletting – ett barn (høyre)



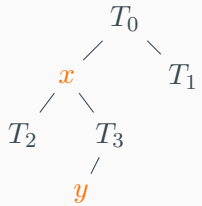


- Helt tilsvarende, når noden har ett barn på høyre side, erstatt x med T_2

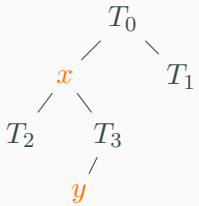
Sletting – to barn

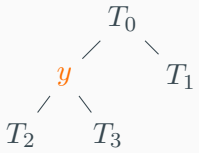


Sletting – to barn

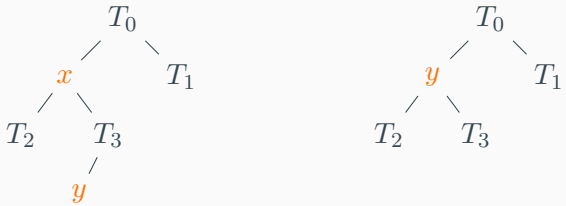


Sletting – to barn





Sletting – to barn



- Når noden har to barn, erstatt x med det minste elementet y i høyre subtre

Finn minste

- For sletting trenger vi en prosedyre for å finne minste element

ALGORITHM: FINN MINSTE NODE

`Input:` En node v
`Output:` Returner noden som inneholder den minste etterkommeren av v

Finn minste

- For sletting trenger vi en prosedyre for å finne minste element

ALGORITHM: FINN MINSTE NODE

`Input:` En node v
`Output:` Returner noden som inneholder den minste etterkommeren av v

Finn minste

- For sletting trenger vi en prosedyre for å finne minste element

ALGORITHM: FINN MINSTE NODE

Input: En node v
Output: Returner noden som inneholder den minste etterkommeren av v

```
1 Procedure FindMin(v)
2 |   Etterlatt som øvelse!
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

`Input:` En node v og et element x
`Output:` Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1 Procedure Remove(v, x)
2     if v = null then
3         return null
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x

Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1 Procedure Remove(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if x < v.element then
5         v.left ← Remove(v.left, x)
6         return v
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1 Procedure Remove(v, x)
2     if v = null then
3         return null
4     if x < v.element then
5         v.left ← Remove(v.left, x)
6         return v
7     if x > v.element then
8         v.right ← Remove(v.right, x)
9         return v
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1  Procedure Remove(v, x)
2      if v = null then
3          return null
4      if x < v.element then
5          v.left ← Remove(v.left, x)
6          return v
7      if x > v.element then
8          v.right ← Remove(v.right, x)
9          return v
10     if v.left = null then
11         return v.right
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1  Procedure Remove(v, x)
2      if v = null then
3          return null
4      if x < v.element then
5          v.left ← Remove(v.left, x)
6          return v
7      if x > v.element then
8          v.right ← Remove(v.right, x)
9          return v
10     if v.left = null then
11         return v.right
12     if v.right = null then
13         return v.left
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1  Procedure Remove(v, x)
2      if v = null then
3          return null
4      if x < v.element then
5          v.left ← Remove(v.left, x)
6          return v
7      if x > v.element then
8          v.right ← Remove(v.right, x)
9          return v
10     if v.left = null then
11         return v.right
12     if v.right = null then
13         return v.left
14     u ← FindMin(v.right)
15     v.element ← u.element
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1  Procedure Remove(v, x)
2      if v = null then
3          return null
4      if x < v.element then
5          v.left ← Remove(v.left, x)
6          return v
7      if x > v.element then
8          v.right ← Remove(v.right, x)
9          return v
10     if v.left = null then
11         return v.right
12     if v.right = null then
13         return v.left
14     u ← FindMin(v.right)
15     v.element ← u.element
16     v.right ← Remove(v.right, u.element)
```

Sletting

ALGORITHM: SLETT EN NODE I ET BINÆRT SØKETRE

Input: En node v og et element x
Output: Dersom x forekommer i en node u som en etterkommer av v, fjern u.

```
1  Procedure Remove(v, x)
2      if v = null then
3          return null
4      if x < v.element then
5          v.left ← Remove(v.left, x)
6          return v
7      if x > v.element then
8          v.right ← Remove(v.right, x)
9          return v
10     if v.left = null then
11         return v.right
12     if v.right = null then
13         return v.left
14     u ← FindMin(v.right)
15     v.element ← u.element
16     v.right ← Remove(v.right, u.element)
17     return v
```