

# Tweede college algoritmiek

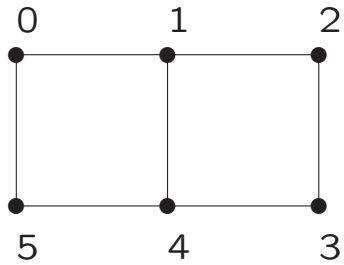
13 februari 2009

Grafen, bomen en  
toestand-actie-ruimte

Een **graaf**  $G$  wordt gedefinieerd als een paar  $(V, E)$ , waarbij  $V$  een eindige verzameling is van **knopen** (vertices) en  $E$  een verzameling van paren van knopen: de **takken/pijlen** (edges). Een tak/pijl  $(u, v)$  verbindt de knopen  $u$  en  $v$  met elkaar.

### Terminologie:

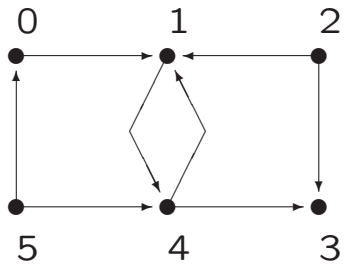
- ongerichte/gerichte graaf
- gewogen graaf
- paden en cykels/kringen
- samenhangend
- acyclisch



1.

$$V = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\};$$

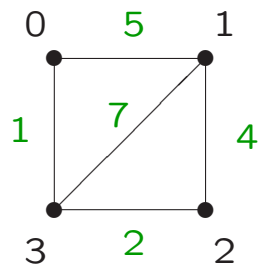
$$E = \{(0, 1), (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 0), (4, 1)\}$$



2.

$$V = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$E = \{(0, 1), (2, 1), (2, 3), (4, 3), (5, 4), (5, 0), (4, 1), (1, 4)\}$$



3.

$$V = \{0, 1, 2, 3\};$$

$$E = \{(0, 1), (1, 2), (2, 3), (0, 3), (1, 3)\}$$

Een **pad** van  $u$  naar  $v$  is een rij knopen waarvoor geldt dat tussen elk tweetal opeenvolgende knopen uit die rij een tak zit (resp. een pijl loopt van de ene naar de volgende knoop; dan: gericht pad).

De lengte van een pad = het aantal takken op dat pad = het aantal knopen - 1.

Als alle knopen verschillend zijn heet het pad **enkelvoudig**.

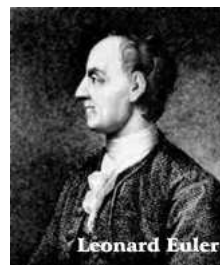
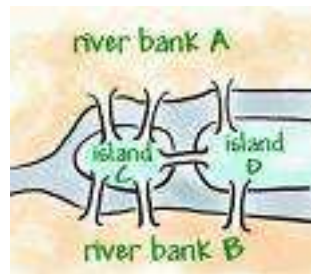
Een **kring** in een ongerichte graaf is een pad met minstens 3 knopen, dat begint en eindigt in dezelfde knoop en dat geen enkele tak meer dan één keer bevat.

Een ongerichte graaf heet **samenhangend** als er tussen elk tweetal knopen  $u$  en  $v$  een pad loopt.

Een graaf die geen kringen bevat heet **acyclisch**.

Twee zeer bekende graafproblemen:

Koningsberger bruggen probleem Vierkleurenprobleem

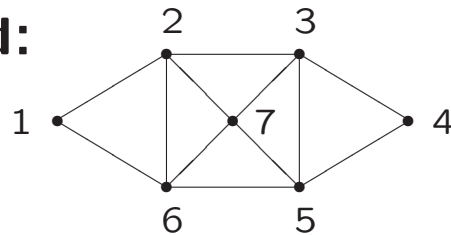


Hoezo  
graafproblemen?

**Definitie:** een wandeling (pad) in een ongerichte graaf die terugkeert in zijn beginpunt en die *alle* takken precies één keer doorloopt heet een **Eulerkring**\*. Analoog: **Eulerpad**.

**Probleem.** Gegeven een ongerichte graaf  $\mathcal{G}$ . Heeft  $\mathcal{G}$  een Eulerkring?

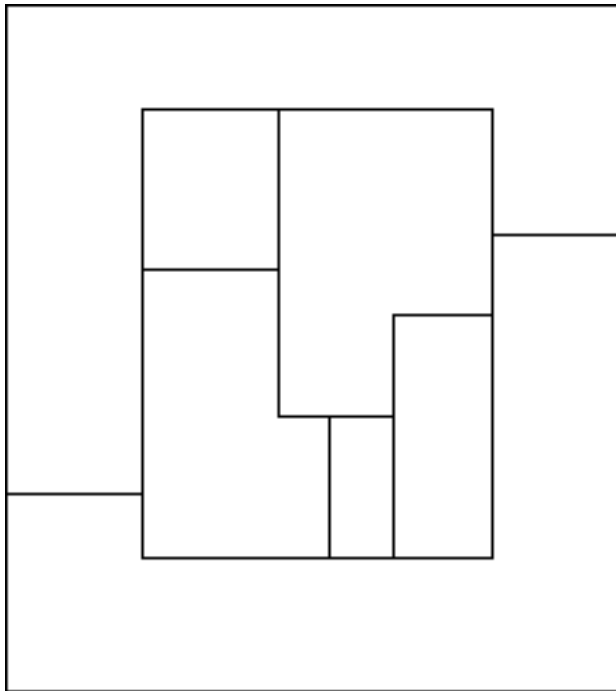
**Voorbeeld:**



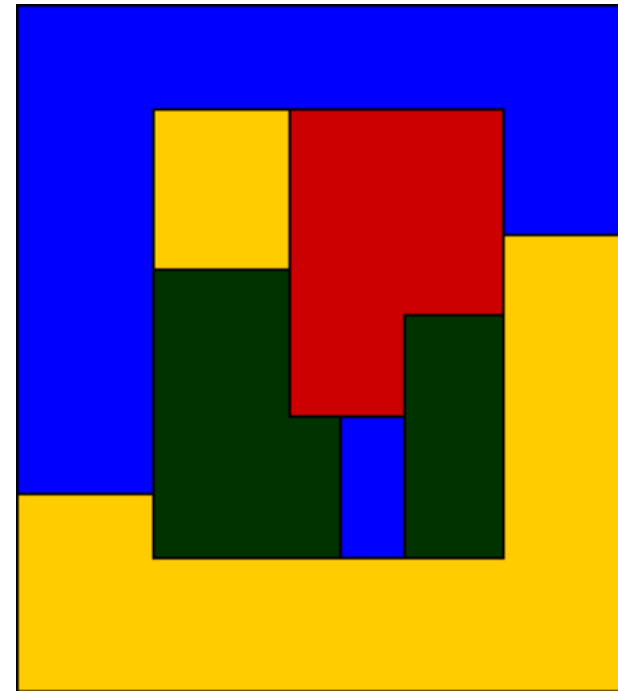
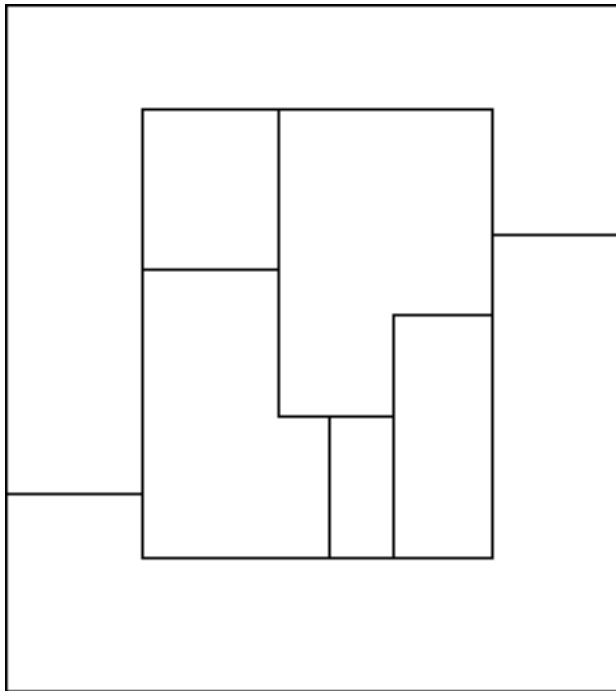
Voor deze graaf is 1 2 3 4 5 3 7 5 6 7 2 6 1 een Eulerkring.

\* Een **kring** is een pad met minstens 3 knopen dat begint en eindigt in dezelfde knoop en dat geen enkele tak meer dan één keer doorloopt.

Kleur de landkaart met maximaal vier kleuren onder de restrictie dat buurlanden een verschillende kleur hebben:



Kleuring van de landkaart met maximaal vier kleuren onder de restrictie dat buurlanden een verschillende kleur hebben:



**Adjacency matrix:** de **ongerichte** graaf wordt gerepresenteerd door een tweedimensionaal array `int inhoud[n][n]` ( $n$  het aantal knopen), waarbij `inhoud[i][j]` aangeeft of er een tak tussen  $i$  en  $j$  zit.

**Adjacency list:** de **ongerichte** graaf wordt gerepresenteerd door een eendimensionaal array `buur* inhoud[n]` ( $n$  het aantal knopen), waarbij `inhoud[i]` de ingang is tot een lijst van burens van knoop  $i$ .

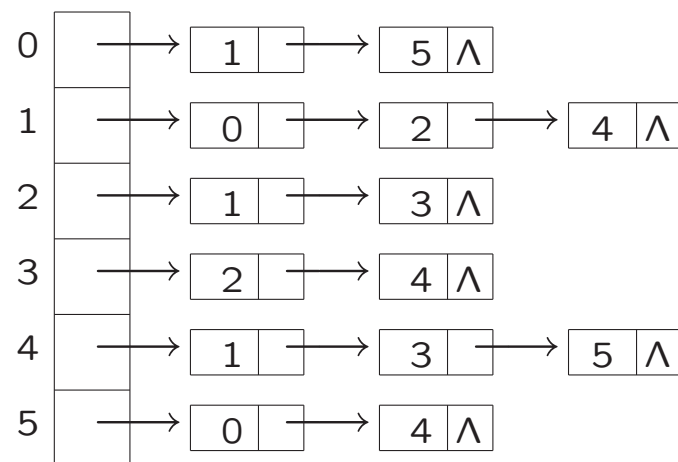
Adjacency list representatie in C++:

```
struct buur {
    int knoopnummer;
    buur* volgende;
}
buur* inhoud[n];
```

Adjacency matrix en adjacency list voor voorbeeldgraaf **1**:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

adjacency matrix

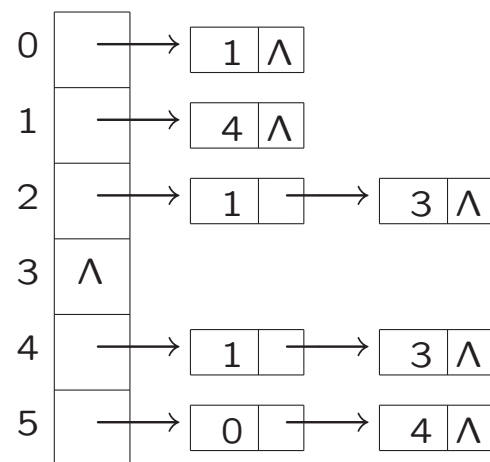


adjacency list

Adjacency matrix en adjacency list voor voorbeeldgraaf 2:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

adjacency matrix



adjacency list

Geef een algoritme dat de pijl  $(i, j)$  in een gegeven gerichte graaf omdraait.

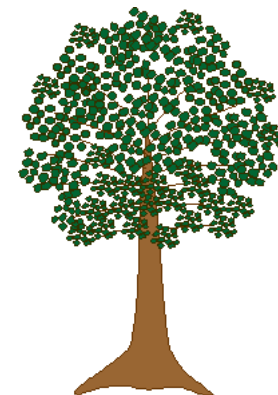
```
// het array graaf (buur* graaf[n]) bevat de gerichte graaf
buur* hulp1 = graaf[i]; buur* hulp2 = NULL;
while ( hulp1->knoopnummer != j ) { // knoop j zoeken
    hulp2 = hulp1; hulp1 = hulp1->volgende;
}
if ( hulp2 != NULL ) { // verwijder j
    hulp2->volgende = hulp1->volgende;
}
else { // j is eerste buur van i; verwijder j;
    graaf[i] = hulp1->volgende;
}
delete hulp1; // gooi buur weg
// voeg nu i vooraan in de buurlijst van j toe
buur* hulp = new buur;
hulp->knoopnummer = i; hulp->volgende = graaf[j];
graaf[j] = hulp;
```

Definitie: een **boom** is een samenhangende (= uit één stuk bestaande) ongerichte graaf zonder cykels (= kringen).

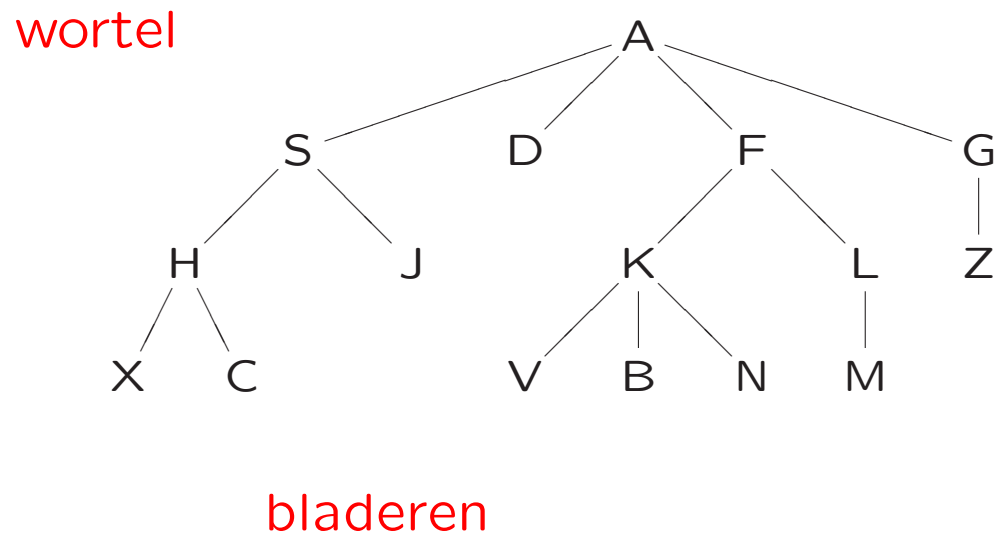
Wijs een speciale knoop aan, de *wortel*. Teken de wortel bovenaan en alle paden vanuit de wortel naar beneden: dit geeft een hiërarchische structuur die lijkt op een stamboom. Dit heet ook wel een **georiënteerde boom**. Meestal spreken we gewoon van een boom.

Stamboomterminologie: kind  $\longleftrightarrow$  ouder,  
afstammeling  $\longleftrightarrow$  voorouder.

In een georiënteerde boom hebben we dus ouder-kind relaties tussen knopen.

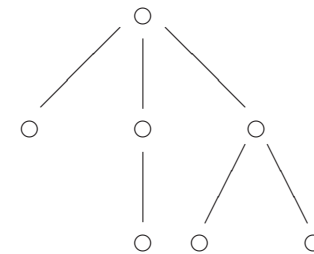
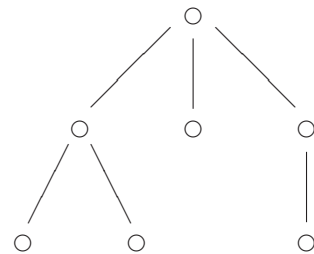


Terminologie: takken, knopen, nivo, hoogte, wortel, bladeren  $\longleftrightarrow$  interne knopen

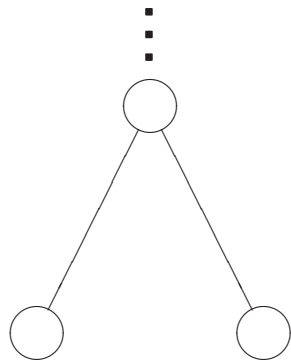


De **wortel** (hier A) is de *enige* ingang tot de boom.

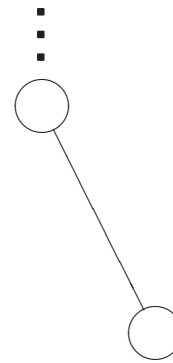
- Een acyclische graaf die niet samenhangend is heet een **bos**. Het is namelijk een collectie bomen.
- Voor bomen geldt: aantal takken = aantal knopen - 1.
- Een **geordende boom** is een boom waarin van elke knoop de kinderen geordend zijn: oudste kind, een na oudste kind, ..., jongste kind.
- Onderstaande bomen zijn als georiënteerde bomen wel gelijk, maar als geordende georiënteerde bomen niet:



Een **binaire boom** is een boom waarin elke knoop ofwel nul, ofwel één ofwel twee kinderen heeft; als een knoop twee kinderen heeft dan is het ene kind het **linkerkind**, het andere het **rechterkind**; als een knoop één kind heeft, dan is dit ofwel een linkerkind, ofwel een rechterkind.

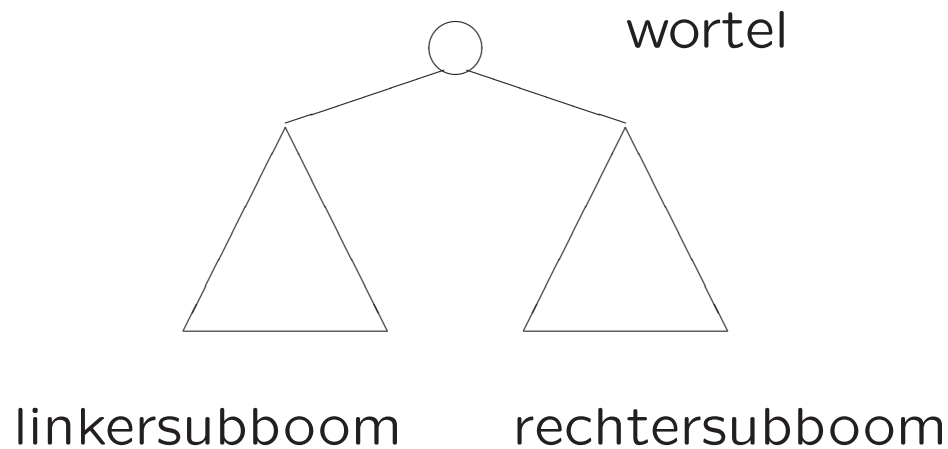


linkerkind    rechterkind



één kind: rechterkind

**Recursieve definitie:** een binaire boom is een eindige verzameling knopen die ofwel leeg is, ofwel bestaat uit een speciale knoop (de wortel) en twee disjuncte verzamelingen knopen die samen de rest van alle knopen vormen. Die knoopverzamelingen vormen beide ook weer een binaire boom: de **linkersubboom** en de **rechtsubboom**.



```
class knoop { // een struct mag ook
public:
    knoop ( ) { // constructor
        info = 0; links = NULL; rechts = NULL; }
    int info;
    knoop* links;
    knoop* rechts;
}; // knoop
```

De binaire boom wordt gerepresenteerd door middel van een pointer naar de wortel:

```
knoop* wortel; // de ingang tot de binaire boom
```

Netter om een klasse te gebruiken: zie [Programmeermethoden](#)

WLR (preorde):

bezoek wortel

doorloop linkersubboom WLR

doorloop rechtersubboom WLR

LWR (symmetrisch):

doorloop linkersubboom LWR

bezoek wortel

doorloop rechtersubboom LWR

LRW (postorde): analoog

```
void preorde (knoop* root) {
    if ( root != NULL ) {
        cout << root->info << endl;
        preorde (root->links);
        preorde (root->rechts);
    } // if
} // preorde

void symmetrisch (knoop* root) {
    if ( root != NULL ) {
        symmetrisch (root->links);
        cout << root->info << endl;
        symmetrisch (root->rechts);
    } // if
} // symmetrisch
```

We tellen *recursief* het aantal knopen van een binaire boom met ingang wortel.

Aanroep: `int tellen = aantal (wortel);`

```
int aantal (knoop* root) {
    if ( root == NULL )        // lege boom
        return 0;
    else
        return ( 1 + aantal (root->links)
                + aantal (root->rechts) );
} // aantal
```

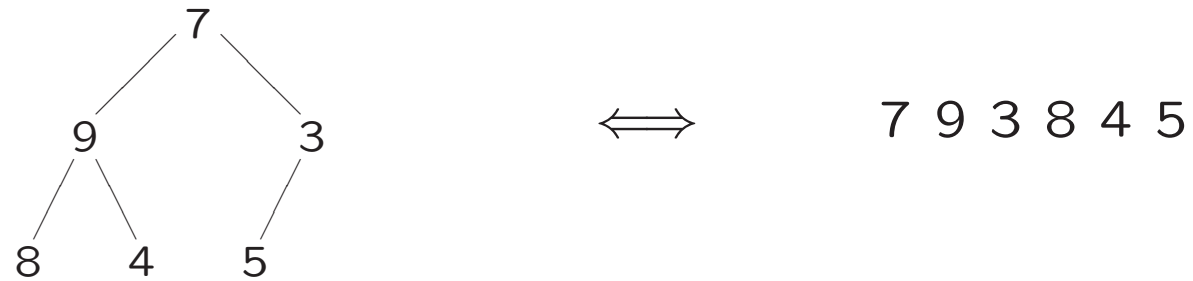
Merk op dat hier eigenlijk een preorde-wandeling wordt gedaan.

We breken de binaire boom met ingang wortel helemaal af: hiertoe wordt eerst de linkersubboom (recursief) weggegooid, daarna de rechtersubboom en ten slotte de wortel zelf. Aanroep: `breekaf (wortel);`

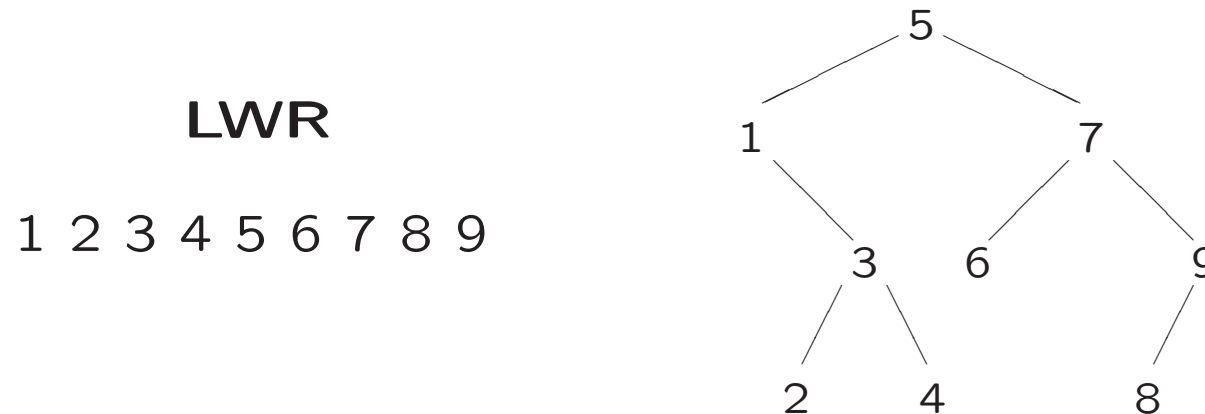
```
void breekaf (knoop* & root) {
    if ( root != NULL ) {
        breekaf (root->links);      L
        breekaf (root->rechts);    R
        delete root;              W
        root = NULL;
    } // if
} // breekaf
```

- Voor de hoogte  $h$  van een binaire boom met  $n$  knopen geldt:  $\lfloor \log_2 n \rfloor = \lceil \log_2(n + 1) \rceil - 1 \leq h \leq n - 1$
- Een **complete** binaire boom is een binaire boom waarbij alle nivo's geheel vol zitten, behalve eventueel het onderste. Op het onderste nivo mogen alleen de meest rechter knopen missen.
- Een **binaire zoekboom** is een binaire boom waarbij voor elke knoop geldt dat de waarde in die knoop groter is dan alle waarden in zijn linkersubboom, en kleiner dan alle waarden in zijn rechtersubboom.

Complete binaire boom:



Binaire zoekboom:



**Probleem**  $\longrightarrow$  **Toestand-actie-ruimte**

Een **toestand-actie-ruimte** (toestand-actie-diagram, state transition diagram, toestandsruimte, state space)

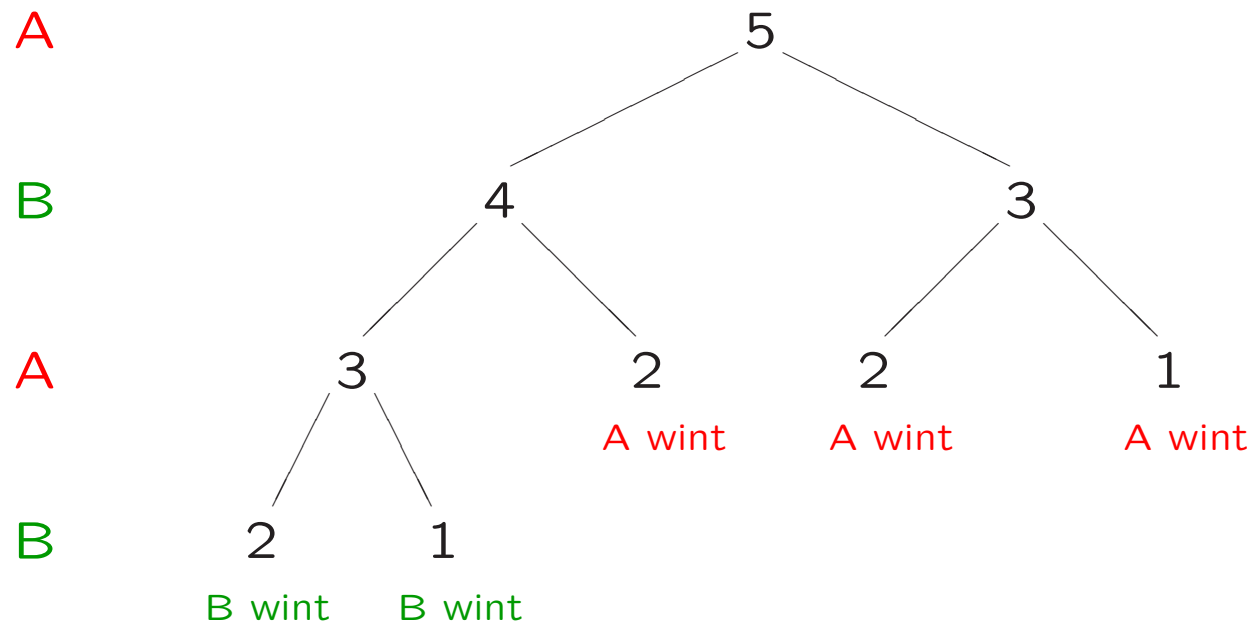
- *Bestaat uit* alle mogelijke **toestanden en acties**
- Begintoestand, eindtoestand(en)
- Een actie veroorzaakt een overgang van de ene (toegelaten) toestand naar een andere
- *Oplossing* van het probleem: een opeenvolging van acties die van de begintoestand naar een eindtoestand leiden

**Voorbeeld 1: NIM**

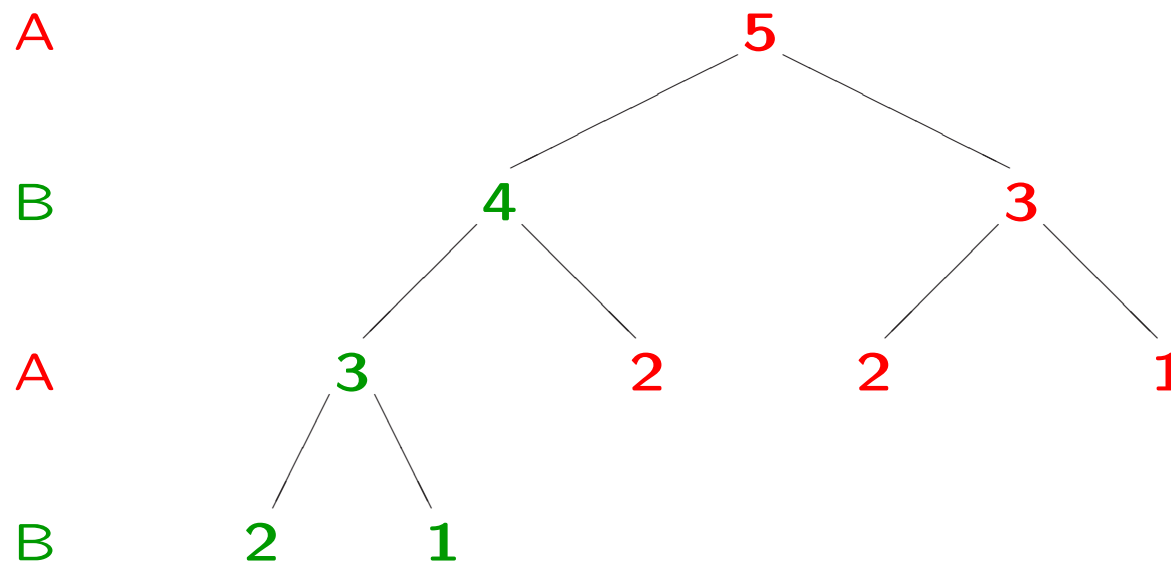
- We beginnen met één stapel van  $n$  lucifers (begintoestand)
- Er zijn twee spelers: **A** en **B**
- De spelers pakken om de beurt 1 of 2 lucifers (acties)
- Het spel is afgelopen als er geen lucifers meer op de stapel liggen (eindtoestand)
- De speler die de laatste lucifer(s) pakt heeft gewonnen

**Gevraagd:** is het spel winnend voor degene die begint?

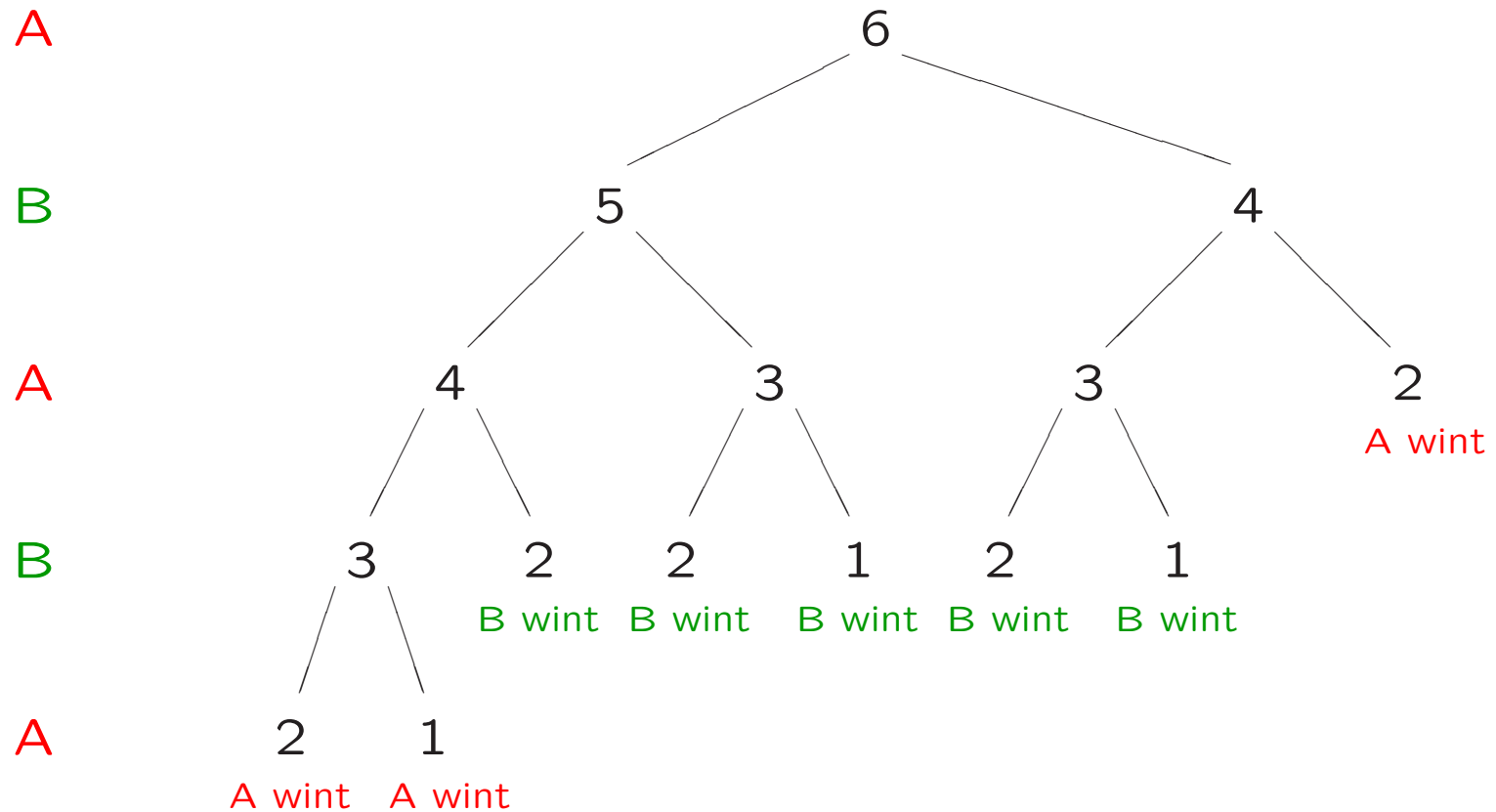
toestand-actie-ruimte (spelboom)  $n = 5$



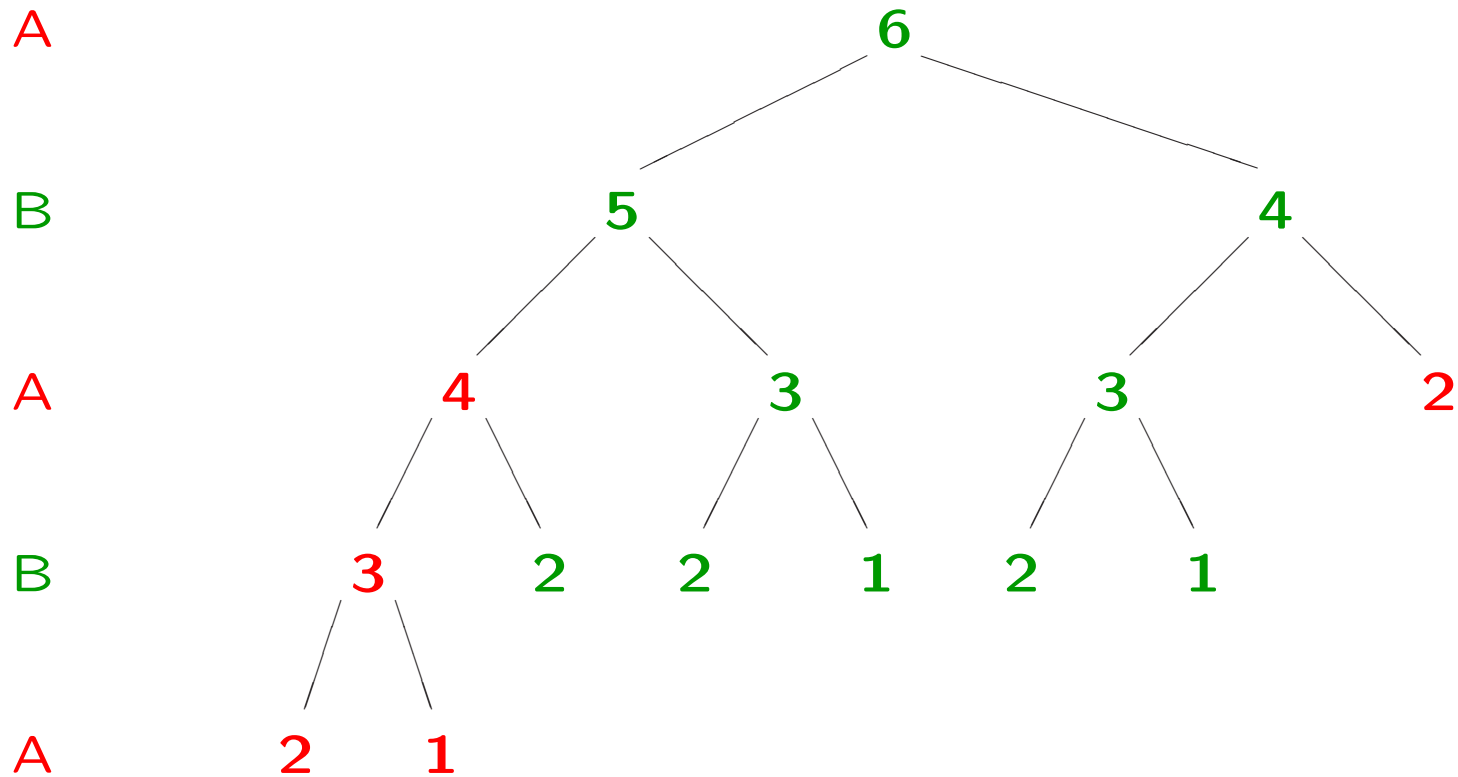
**Winnend voor A.**  
 Winnende zet: 2 lucifers wegnemen



toestand-actie-ruimte (spelboom)  $n = 6$



**A kan niet winnen** (bij perfect spel van B)



**Voorbeeld 2: Old world puzzle (Ex. 1.2.1.)**

We hebben een kool, een geit, een wolf en een boer. Deze moeten met een bootje van de ene kant van de rivier naar de andere. In het bootje kan alleen de boer met één ander iets. Als de boer er niet bij is zal de wolf de geit opeten en de geit de kool. De boer is de enige die de boot kan “besturen”.

**Vraag:** Hoe kan alles naar de andere oever verplaatst worden?



- **Werkcollege:**

donderdag 19 februari 2009, 9.00-10.45, in computerzaal 302/304

- **Opgaven:**

zie <http://www.liacs.nl/home/graaf/ALGO/>

- **Volgend college:**

vrijdag 20 februari 2009