

Gevorderde algoritmen

Bert De Saffel

Master in de Industriële Wetenschappen: Informatica Academiejaar 2018–2019

Gecompileerd op 7 augustus 2019

Inhoudsopgave

I	Gegevensstructuren II	4
1	Toepassingen van dynamisch programmeren	5
1.1	Optimale binaire zoekbomen	5
1.2	Langste gemeenschappelijke deelsequentie	8
2	Uitwendige gegevensstructuren	10
2.1	B-trees	10
2.1.1	Definitie	10
2.1.2	Eigenschappen	11
2.1.3	Woordenboekoperaties	11
2.1.4	Varianten van B-trees	13
2.2	Uitwendige hashing	14
2.2.1	Extendible hashing	14
2.2.2	Linear hashing	15
3	Meerdimensionale gegevensstructuren	16
3.1	Projectie	16
3.2	Rasterstructuur	17
3.3	Quadtrees	17
3.3.1	Point quadtree	17
3.3.2	PR quadtree	18
3.4	K-d trees	19
4	Samenvoegbare heaps	20
4.1	Binomiale queues	20
4.2	Pairing heaps	22

II Grafen II 23

5 Toepassingen van diepte-eerst zoeken 24

5.1	Enkelvoudige samenhang van grafen	24
5.1.1	Samenhangende componenten van een ongerichte graaf	24
5.1.2	Sterk samenhangende componenten van een gerichte graaf	24
5.2	Dubbele samenhang van ongerichte grafen	25
5.3	Eulergraaf	25

6 Kortste afstanden II 27

6.1	Kortste afstanden vanuit één knoop	27
6.1.1	Algoritme van Bellman-Ford	27
6.2	Kortste afstanden tussen alle knopenparen	28
6.2.1	Het algoritme van Johnson	28
6.3	Transitieve sluiting	29

7 Stroomnetwerken 30

7.1	Maximale stroomprobleem	30
-----	-----------------------------------	----

III Strings 32

8 Gegevensstructuren voor strings 33

8.1	Inleiding	33
8.2	Digitale zoekbomen	33
8.3	Tries	34
8.3.1	Binaire tries	34
8.3.2	Meerwegstries	35

IV Hardnekkige problemen 36

9 NP 37

9.1	Complexiteit: P en NP	37
9.1.1	Complexiteitsklassen	38
9.2	NP-complete problemen	39
9.2.1	Het basisprobleem: SAT (en 3SAT)	39
9.2.2	Vertex Cover	39

9.2.3	Dominating set	41
9.2.4	Graph Coloring	41
9.2.5	Clique	41
9.2.6	Independent set	41
9.2.7	Hamilton path	41
9.2.8	Minimum cover	41
9.2.9	Subset sum	41
9.2.10	Partition	42
9.2.11	TSP	42
9.2.12	Longest path	42
9.2.13	Bin packing	42
9.2.14	Knapsack	42
10	Metaheuristieken	43
10.1	Combinatorische optimalisatie	43

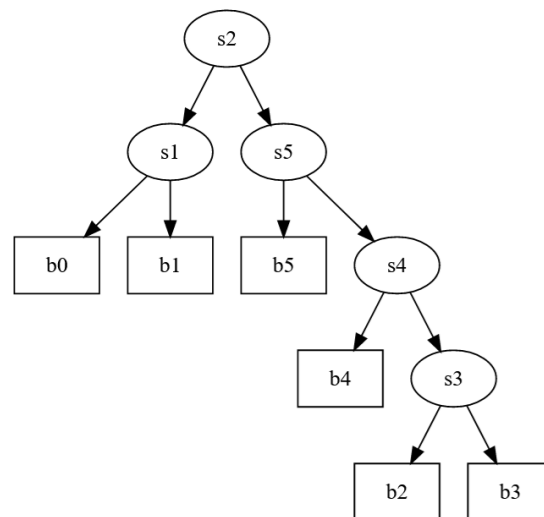
Deel I

Gegevensstructuren II

Hoofdstuk 1

Toepassingen van dynamisch programmeren

1.1 Optimale binaire zoekbomen



Figuur 1.1: Een optimale binaire zoekboom met bijhorende kansentabel.

i	0	1	2	3	4	5
p_i		0.15	0.10	0.05	0.10	0.20
q_i	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.10

- Veronderstel dat de gegevens die in een binaire zoekboom moeten opgeslaan worden op voorhand gekend zijn.
- Veronderstel ook dat de waarschijnlijkheid gekend is waarmee de gegevens gezocht zullen worden.
- Tracht de boom zo te schikken zodat de verwachtingswaarde van de zoektijd minimaal wordt.

- De zoektijd wordt bepaald door de lengte van de zoekweg.
- De gerangschikte sleutels van de n gegevens zijn s_1, \dots, s_n .
- De $n + 1$ bladeren zijn b_0, \dots, b_n .
 - Elk blad staat voor een afwezig gegeven die in een deelboom op die plaats had moeten zitten.
 - Het blad b_0 staat voor alle sleutels kleiner dan s_1 .
 - Het blad b_n staat voor alle sleutels groter dan s_n .
 - Het blad b_i staat voor alle sleutels groter dan s_i en kleiner dan s_{i+1} , met $1 \leq i < n$
- De waarschijnlijkheid om de i -de sleutel s_i te zoeken is p_i .
- De waarschijnlijkheid om alle afwezige sleutels, voorgesteld door een blad b_i , te zoeken is q_i .
- De som van alle waarschijnlijkheden moet 1 zijn:

$$\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=0}^n q_i = 1$$

- Als de zoektijd gelijk is aan het aantal knopen op de zoekweg (de diepte plus één), dan is de verwachtingswaarde van de zoektijd

$$\sum_{i=1}^n p_i(\text{diepte}(s_i) + 1) + \sum_{i=0}^n q_i(\text{diepte}(b_i) + 1)$$

- Deze verwachtingswaarde moet geminimaliseerd worden.
 - Boom met minimale hoogte is niet voldoende.
 - Alle mogelijke zoekbomen onderzoeken is ook geen optie, hun aantal is

$$\begin{aligned} \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n} &\sim \frac{1}{n+1} \cdot \frac{2^{2n}}{\sqrt{\pi n}} \\ &\sim \frac{1}{n+1} \cdot \frac{4^n}{\sqrt{\pi n}} \\ &\sim \Omega\left(\frac{4^n}{n\sqrt{n}}\right) \end{aligned}$$

✓ Dynamisch programmeren biedt een uitkomst.

- Een optimalisatieprobleem komt in aanmerkingen voor een efficiënte oplossing via dynamisch programmeren als het:
 1. het een **optimale deelstructuur** heeft;
 2. de **deelproblemen onafhankelijk maar overlappend** zijn.
- Is dit hier van toepassing?
 - Is er een optimale deelstructuur?
 - ◊ Als een zoekboom optimaal is, moeten zijn deelbomen ook optimaal zijn.
 - ◊ Een optimale oplossing bestaat uit optimale oplossingen voor deelproblemen.
 - Zijn de deelproblemen onafhankelijk?
 - ◊ Ja want deelbomen hebben geen gemeenschappelijke knopen.

- Zijn de deelproblemen overlappend?
 - ◊ Elke deelboom bevat een reeks opeenvolgende sleutels s_i, \dots, s_j met bijhorende bladeren b_{i-1}, \dots, b_j .
 - ◊ Deze deelboom heeft een wortel s_w waarbij $(i \leq w \leq j)$.
 - ◊ De linkse deelboom bevat de sleutels s_i, \dots, s_{w-1} en bladeren b_{i-1}, \dots, b_{w-1} .
 - ◊ De rechtse deelboom bevat de sleutels s_{w+1}, \dots, s_j en bladeren b_w, \dots, b_j .
 - ◊ Voor een optimale deelboom met wortel s_w moeten deze beide deelbomen ook optimaal zijn.
 - ◊ Deze wordt gevonden door:
 1. achtereenvolgens elk van zijn sleutels s_i, \dots, s_j als wortel te kiezen;
 2. de zoektijd voor de boom te berekenen door gebruikte maken van de zoektijden van de optimale deelbomen;
 3. de wortel te kiezen die de kleinste zoektijd oplevert.
- We willen dus de kleinste verwachte zoektijd $z(i, j)$.
- Dit moet gebeuren voor alle i en j waarbij:
 - $1 \leq i \leq n+1$
 - $0 \leq j \leq n$
 - $j \geq i-1$
- De optimale boom heeft dus de kleinste verwachte zoektijd $z(1, n)$.
- Hoe $z_w(i, j)$ bepalen voor een deelboom met wortel s_w ?
 - Gebruik de kans om in de wortel te komen.
 - Gebruik de optimale zoektijden van zijn deelbomen, $z(i, w-1)$ en $z(w+1, j)$.
 - Gebruik ook de diepte van elke knoop, maar elke knoop staat nu op een niveau lager.
 - ◊ De bijdrage tot de zoektijd neemt toe met de som van de zoekwaarschijnlijkheden.

$$g(i, j) = \sum_{k=i}^j p_k + \sum_{k=i-1}^j q_k$$

- Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} z_w(i, j) &= p_w + (z(i, w-1) + g(i, w-1)) + (z(w+1, j) + g(w+1, j)) \\ &= z(i, w-1) + z(w+1, j) + g(i, j) \end{aligned}$$

- Dit moet minimaal zijn \rightarrow achtereenvolgens elke sleutel van de deelboom tot wortel maken.
 - De index w doorloopt alle waarden tussen i en j .

$$\begin{aligned} z(i, j) &= \min_{i \leq w \leq j} \{z_w(i, j)\} \\ &= \min_{i \leq w \leq j} \{z(i, w-1) + z(w+1, j)\} + g(i, j) \end{aligned}$$

- Hoe wordt de optimale boom bijgehouden?
 - Hou enkel de index w bij van de wortel van elke optimale deelboom.
 - Voor de deelboom met sleutels s_i, \dots, s_j is de index $w = r(i, j)$.
- Implementatie:

- Een recursieve implementatie zou veel deeloplossingen opnieuw berekenen.
- Daarom **bottom-up** implementeren. Maakt gebruik van drie tabellen:
 1. Tweedimensionale tabel $z[1..n+1, 0..n]$ voor de waarden $z(i, j)$.
 2. Tweedimensionale tabel $g[1..n+1, 0..n]$ voor de waarden $g(i, j)$.
 3. Tweedimensionale tabel $r[1..n, 1..n]$ voor de indices $r(i, j)$.
- Algoritme:
 1. Initialiseer de waarden $z(i, i-1)$ en $g(i, i-1)$ op $q[i-1]$.
 2. Bepaal achtereenvolgens elementen op elke evenwijdige diagonaal, in de richting van de tabelhoek linksboven.
 - ◇ Voor $z(i, j)$ zijn de waarden $z(i, i-1), z(i, i), \dots, z(i, j-1)$ van de linkse deelboom nodig en de waarden $z(i+1, j), \dots, z(j, j), z(j+1, j)$ van de rechtse deelboom nodig.
 - ◇ Deze waarden staan op diagonalen onder deze van $z(i, j)$.
- Efficiëntie:
 - **Bovengrens:** drie verneste lussen $\rightarrow O(n^3)$.
 - **Ondergrens:**
 - ◇ Meeste werk bevindt zich in de binneste lus.
 - ◇ Een deelboom met sleutels s_i, \dots, s_j heeft $j-i+1$ mogelijke wortels.
 - ◇ Elke test is $O(1)$.
 - ◇ Dit werk is evenredig met

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n (j-i+1) \\
 \Rightarrow & \sum_{i=1}^n i^2 \\
 \Rightarrow & \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \\
 \Rightarrow & \Omega(n^3)
 \end{aligned}$$

- **Algemeen:** $\Theta(n^3)$.
- Kan met een bijkomende eigenschap (zien we niet in de cursus) gereduceerd worden tot $\Theta(n^2)$.

1.2 Langste gemeenschappelijke deelsequentie

- Een deelsequentie van een string wordt bekomen door nul of meer stringelementen weg te laten.
- Elke deelstring is een deelsequentie, maar niet omgekeerd.
- Een langste gemeenschappelijke deelsequentie (LGD) van twee strings kan nagaan hoe goed deze twee strings op elkaar lijken.
- Geven twee strings:
 - $X = \langle x_0, x_1, \dots, x_{n-1} \rangle$
 - $Y = \langle y_0, y_1, \dots, y_{m-1} \rangle$
- Hoe LGD bepalen?

- Is er een optimale deelstructuur?
 - ◊ Een optimale oplossing maakt gebruik van optimale oplossingen voor deelproblemen.
 - ◊ De deelproblemen zijn paren prefixen van de twee strings.
 - ◊ Het prefix van X met lengte i is X_i .
 - ◊ Het prefix van Y met lengte j is Y_j .
 - ◊ De ledige prefix is X_0 en Y_0 .
- Zijn de deelproblemen onafhankelijk?
 - ◊ Stel $Z = \langle z_0, z_1, \dots, z_{k-1} \rangle$ de LGD van X en Y . Er zijn drie mogelijkheden:
 1. Als $n = 0$ of $m = 0$ dan is $k = 0$.
 2. Als $x_{n-1} = y_{m-1}$ dan is $z_{k-1} = x_{n-1} = y_{m-1}$ en is Z een LGD van X_{n-1} en Y_{m-1} .
 3. Als $x_{n-1} \neq y_{m-1}$ dan is Z een LGD van X_{n-1} en Y of een LGD van X en Y_{m-1} .
- Zijn de deelproblemen overlappend?
 - ◊ Om de LGD van X en Y te vinden is het nodig om de LGD van X en Y_{m-1} als van X_{n-1} en Y te vinden.
- De lengte $c[i, j]$ van de LGD van X_i en Y_j wordt door een recursieve vergelijking bepaald:

$$c[i, j] = \begin{cases} 0 & \text{als } i = 0 \text{ of } j = 0 \\ c[i-1, j-1] + 1 & \text{als } i > 0 \text{ en } j > 0 \text{ en } x_i = y_j \\ \max(c[i, j-1], c[i-1, j]) & \text{als } i > 0 \text{ en } j > 0 \text{ en } x_i \neq y_j \end{cases}$$
- De lengte van de LGD komt overeen met $c[n, m]$.
- De waarden $c[i, j]$ kunnen eenvoudig per rij van links naar rechts bepaald worden door de recursierelatie.
- Efficiëntie:
 - We beginnen de tabel in te vullen vanaf $c[1, 1]$ (als $i = 0$ of $j = 0$ zijn de waarden 0).
 - De tabel c wordt rij per rij, kolom per kolom ingevuld.
 - De vereiste plaats en totale performantie is beiden $\Theta(nm)$.

Hoofdstuk 2

Uitwendige gegevensstructuren

- Als de grootte van de gegevens de capaciteit van het intern geheugen overschrijdt, moeten deze gegevens opgeslagen worden in extern geheugen.
- We willen dat woordenboekoperaties nog steeds efficiënt uitgevoerd worden.
- Een harde schijf is veel trager dan een processor.
- Daarom moet het aantal schijfoperaties geminimaliseerd worden.

2.1 B-trees

- Uitwendige evenwichte zoekboom.
- Heeft een zeer kleine hoogte.
- Het aantal sleutels n is wel zeer groot.
- Er worden dus meerdere kinderen per knoop opgeslagen.
- Knopen kunnen best een volledige schijfpagina benutten.

2.1.1 Definitie

- Een B-tree heeft een orde m waarbij $m > 2$.
 - Elke inwendige knoop heeft hoogstens m kinderen.
 - Elke inwendige knoop, behalve de wortel, heeft minstens $\lceil m/2 \rceil$ kinderen.
 - Elke inwendige knoop met $k + 1$ kinderen bevat k sleutels.
 - Elk blad bevat hoogstens $m - 1$ en minstens $\lceil m/2 \rceil - 1$ sleutels.
 - De wortel bevat tenminste 2 kinderen, tenzij hij een blad is.
 - Als de wortel een blad is bevat hij minstens 1 sleutel.
 - Alle bladeren bevinden zich op hetzelfde niveau.
- Elke knoop bevat het volgende:
 - Een geheel getal k dan het huidige aantal sleutels in de knoop aangeeft.
 - Een tabel voor maximaal m pointers naar de kinderen van de knoop.

- Een tabel voor maximaal $m - 1$ sleutels, die stijgend gerangschikt zijn.
 - ◊ Er is ook een tabel die bijhorende informatie per sleutel bijhoudt.
 - ◊ De k geordende sleutels van de inwendige knoop verdelen het sleutelbereik in $k + 1$ deelgebieden.
 - ◊ De sleutels uit de deelboom van het i -de kind c_i liggen tussen de sleutels s_{i-1} en s_i .
- Een logische waarde b die aangeeft of de knoop een blad is of niet.
- 2 – 3 bomen ($m = 3$) of 2 – 3 – 4 bomen ($m = 4$) zijn eenvoudige voorbeelden van B-trees. Normaal is m wel groter.

2.1.2 Eigenschappen

- Het minimaal aantal knopen voor een boom met hoogte h is

$$1 + 2 + 2g + \dots + 2g^{h-1} = 1 + 2 \sum_{i=0}^{h-1} g^i = 1 + 2 \left(\frac{1 - g^h}{1 - g} \right)$$
 - De wortel van een minimale boom heeft slechts 1 sleutel en twee kinderen.
 - Elk kind heeft minimum $g = \lceil m/2 \rceil$ kinderen.
- De hoogte is bijgevolg $O(\lg n)$.
 - Elke knoop heeft minstens $g - 1$ sleutels, behalve de wortel, die er minstens één heeft.

$$\begin{aligned}
 n &\geq 1 + 2(g - 1) \left(\frac{g^h - 1}{g - 1} \right) \\
 &\rightarrow n \geq 2g^h - 1 \\
 &\rightarrow h \leq \log_g \left(\frac{n + 1}{2} \right)
 \end{aligned}$$

- Een B-tree met n uniform verdeelde sleutels gebruikt ongeveer $\frac{n}{m \ln 2}$ schijfpaginas.

2.1.3 Woordenboekoperaties

Zoeken

- In elke knoop moet een meerwegsbeslissing genomen worden.
- De knoop moet eerst in het geheugen ingelezen worden.
- De sleutel wordt opgezocht in de gerangschikte tabel met sleutels.
 - Normaal zou binair zoeken efficiënter zijn, maar deze winst is vrij onbelangrijk.
 - Lineair zoeken kan bij kleine tabellen efficiënter uitvallen door het aantal cachefouten te minimaliseren.
- Er kunnen zich nu drie situaties voordoen:
 1. Als de sleutel in de tabel zit stopt het zoeken, met als resultaat een verwijzing naar de knoop op de schijf.
 2. Als de sleutel niet gevonden is en is de knoop een blad, dan zit de sleutel niet in de boom.

3. Als de sleutel niet gevonden is en de knoop is inwendig, wordt een nieuwe knoop in het geheugen ingelezen waarvan de wortel een kind is van de huidige knoop. Het zoekproces start opnieuw met deze knoop.
- Performantie:
 - Het aantal schijfoperaties is $O(h) = O(\log_g n)$.
 - De procestijd per knoop is $O(m)$.
 - De totale performantie is $O(m \log_g n)$.

Toevoegen

- Toevoegen gebeurt **bottom-up**. Een top-down implementatie is ook mogelijk maar wordt minder gebruikt.
- De structuur van de boom kan gewijzigd worden.
- Toevoegen gebeurt altijd aan een blad.
- Vanuit de wortel wordt eerst het blad gezocht waarin de sleutel zou moeten zitten.
- Drie gevallen:
 - **De B-tree is ledig.**
 - ◊ De wortelknoop moet in het geheugen aangemaakt worden en gedeeltelijk ingevuld worden.
 - ◊ De knoop wordt dan naar de schijf gekopieerd.
 - **De B-tree is niet ledig.**
 - ◊ Het blad waarin de sleutel moet zitten wordt opgezocht. Er zijn dan twee gevallen.
 - ◊ **Het blad bevat minder dan m sleutels.**
 - * De sleutel wordt in de juiste volgorde toegevoegd aan de tabel met sleutels.
 - ◊ **Het blad bevat m sleutels.**
 - * Het blad wordt opgesplitst bij de middelste sleutel.
 - * Er wordt een nieuwe knoop op hetzelfde niveau aangemaakt, waarin de gegevens rechts van de middelste sleutel terechtkomen.
 - * De middelste sleutel gaat naar de ouder.
 - * Normaal gezien heeft de ouder plaats voor deze knoop, anders wordt er opnieuw geplitst.
- Performantie:
 - In het slechtste geval worden er $h + 1$ knopen gesplitst.
 - Een knoop splitsen vereist drie schijfoperaties en een procestijd van $O(m)$.
 - In het slechtste geval moet de boom tweemaal doorlopen worden.
 - ◊ Eerst om de sleutel te vinden.
 - ◊ Daarna eventueel tot de wortel splitsen.
 - ✓ Maar het aantal schijfoperaties per niveau is constant.
 - Het totaal aantal schijfoperaties is dan $\Theta(h)$.
 - De totale performantie is dan $O(mh) = O(m \log_g n)$.

Verwijderen

- Ook hier wordt enkel de **bottom-up** versie besproken.
- De gezochte sleutel kan zowel in een blad als in een inwendige knoop zitten.
 - **De sleutel zit in een blad.**
 - ◊ Er zijn geen kinderen meer dus kan de sleutel verwijderd worden.
 - ◊ Het kan zijn dat het blad nu te weinig sleutels heeft (minder dan $\lceil m/2 \rceil - 1$).
 - ◊ Er wordt een sleutel geleend van de ouder.
 - ◊ In het slechtste geval gaat dit ontlenen door tot aan de wortel.
 - ◊ Een sleutel ontlenen van een wortel die slechts één sleutel bevat maakt hem ledig, zodat de wortel verwijderd wordt.
 - **De sleutel zit in een inwendige knoop.**
 - ◊ De sleutel wordt vervangen door zijn voorloper of opvolger.
 - ◊ Als een knoop nu te weinig sleutels overhoudt, gebeurt er een **rotatie**.
 - * De sleutel van zijn broer gaat naar zijn ouder.
 - * De sleutel van de ouder gaat naar de knoop, die ook een kindwijzer van de broer overneemt.
 - * Dit kan enkel als er een broer is die sleutels kan missen.
 - * Als geen enkele broer een sleutel kan missen, wordt de knoop samengevoegd met een broer.
- Performantie:
 - Analoog aan toevoegen en is dan $O(m \log_g n)$.

2.1.4 Varianten van B-trees

- Nadelen van een gewone B-tree:
 - De bladeren moeten plaats reserveren voor kindwijzers die toch niet gebruikt worden.
 - Inwendige knopen kunnen gegevens bevatten en dat maakt verwijderen veel ingewikkelder.
 - Zoeken naar een opvolger van een sleutel kan $O(\log_g n)$ schijfoperaties vereisen.

B^+ -tree

- Alle gegevens en bijhorende informatie zitten in de bladeren.
- Inwendige knopen worden gebruikt als index om de gegevens snel te lokaliseren.
- Bladeren en inwendige knopen hebben dus een verschillende structuur.
- Er is ook een **sequence set**, een gelinkte lijst van alle bladeren in stijgende sleutelvolgorde.
- De inwendige knopen moeten enkel sleutels bevatten en geen bijhorende informatie zodat de maximale graad groter is dan de bladeren.
- De bladeren moeten geen plaats reserveren voor kindwijzers, zodat ze meer gegevens kunnen bevatten.

Prefix B^+ -tree

- Een variant van een B^+ -tree voor strings.
- Strings kunnen echter veel plaats innemen.
- Om twee deelbomen van elkaar te onderscheiden wordt de kleinste mogelijke prefix bijgehouden.

B^* -tree

- In plaats van enkel gegevens over te brengen naar een buur tijdens het splitsen, worden de gegevens verdeeld over **drie** knopen.
- Beter gevulde knopen betekent een minder hoge boom.

2.2 Uitwendige hashing

- Wanneer de volgorde van de sleutels niet belangrijk is.
- De woordenboekoperaties vereisen gemiddeld slechts $O(1)$.
- Er wordt een binaire trie (hoofdstuk 10) gebruikt.
 - Wanneer een sleutel gezocht wordt, worden de sleutels niet vergeleken maar wel de opeenvolgende bits van de sleutel.
 - Elke deelboom van een trie bevat alle sleutels met een gemeenschappelijk prefix.
 - Alle sleutels van een deelboom kan in één pagina ondergebracht worden.
 - Als de pagina vol geraakt, wordt de knoop (en dus de pagina) gesplitst, en beide pagina's krijgen een nieuwe trieknoop als ouder.
 - De vorm van een trie is onafhankelijk van de toevoegvolgorde.
 - Daarom wordt niet de bits van de sleutels gebruikt, maar de hashwaarde.
- Dit hoofdstuk bespreekt twee methoden: **extendible hashing** en **linear hashing** die beiden het zoeken in de trie elimineren.

2.2.1 Extendible hashing

- Het zoeken in de trie wordt geëlimineerd door de langst mogelijke prefix uit de trie als index te gebruiken in een hashtable.
- Kortere prefixen komen overeen met meerdere tabelelementen die allemaal een verwijzing naar dezelfde pagina moet bevatten.
-

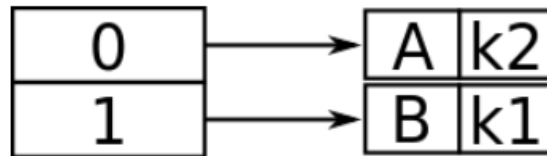
Voorbeeld

- Veronderstel een hashfunctie $h(k)$.
- De eerste i bits van elke hashwaarde wordt gebruikt als index in de hashtable.
- De waarde van i is het kleinste getal zodanig dat elk item in de hashtable uniek is.

- De volgende hashwaarden worden gebruikt:

- $h(k_1) = 100100$
- $h(k_2) = 010110$
- $h(k_3) = 110110$
- $h(k_4) = 011110$

- k_1 en k_2 worden toegevoegd.



Figuur 2.1:

- Deze hashwaarden kunnen onderscheiden worden door het eerste bit.

2.2.2 Linear hashing

Hoofdstuk 3

Meerdimensionale gegevensstructuren

- Gegevens met meer dan één sleutel zijn meerdimensionaal.
- Gegevensstructuren moeten toelaten om op al die sleutels, of in een bereik van meerdere sleutels te zoeken.
- De meeste gegevensstructuren zijn efficiënt voor een klein aantal dimensies.
- De gegevens worden zo gemodelleert zodat ze een geometrische structuur vormen.
- Elk gegeven is een punt in een meerdimensionale Euclidische ruimte.
- Een meerdimensionaal punt zoeken is een speciaal geval van zoeken van alle punten in een meerdimensionale hyperrechthoek.
- Notatie:
 - Het aantal punten is n .
 - Het aantal dimensies is k .

3.1 Projectie

- Per dimensie wordt er een gegevensstructuur (bv gelinkte lijst) bijgehouden die de gesorteerde punten volgens die dimensie bijhoudt.
- Elk punt wordt dus geprojecteerd op elke dimensie.
- Zoeken in een hyperrechthoek gebeurt door een dimensie te kiezen en alle punten te zoeken die voor die dimensie binnen de hyperrechthoek liggen.
- Deze methode werkt als de zoekrechthoek een zijde heeft die de meeste punten uitsluit.
- De **gemiddelde performantie** is $O(n^{1-\frac{1}{k}})$.

3.2 Rasterstructuur

- De zoekruimte wordt verdeelt met behulp van een raster.
- Voor elk rastergebied (een hyperrechthoek) wordt een gelinkte lijst bijgehouden met de punten die erin liggen.
- De punten vinden die in een hyperrechthoek liggen komt neer op het vinden van de rastergebieden die overlappen, en welke van de punten in hun gelinkte lijsten binnen die rechthoek vallen.
- Het aantal rastergebieden is best een constante fractie van n , zodat het gemiddeld aantal punten in elk rastergebied een kleine constante wordt.

3.3 Quadrees

- Een quadtree verdeelt de zoekruimte in 2^k hyperrechthoeken, waarvan de zijden evenwijdig zijn met het assenstelsel.
- Deze verdeling wordt opgeslaan in een 2^k -wegaanboom: elke knoop staat voor een gebied.
- Een quadtree is niet geschikt voor hogere dimensies: er zouden te veel knopen zijn.
- Deze cursus behandelt enkel twee dimensies en er worden enkel **twee-dimensionale punten** opgeslaan.

3.3.1 Point quadtree

- Elke inwendige knoop bevat een punt, waarvan de coördinaten de zoekruimte opdelen in vier rechthoeken.
 - Elk (deel)zoekruimte is de wortel van een deelboom die alle punten in de overeenkomstige rechthoek bevat.
- Woordenboekoperaties:
 - **Zoeken en toevoegen.**
 - ◊ Het zoekpunt wordt telkens vergeleken met de punten van de opeenvolgende knopen.
 - ◊ Als het zoekpunt niet aanwezig is, eindigt de zoekoperatie in een ledig deelgebied, maar kan het punt wel toegevoegd worden als inwendige knoop.
 - ◊ De structuur van een point quadtree is afhankelijk van de toevoegvolgorde, maar is in het gemiddelde geval $O(\lg n)$. In het slechtste geval is het $O(n)$.
 - **Toevoegen als de gegevens op voorhand gekend zijn.**
 - ◊ Er kan voor gezorgd worden dat geen enkel deelgebied meer dan de helft van de punten van die van zijn ouder bevat.
 - ◊ De punten worden lexicografisch gerangschikt en de wortel is de mediaan.
 - ◊ Alle punten voor de mediaan vallen dan in twee van zijn deelbomen, deze erachter in de andere twee.
 - ◊ Bij elk kind gebeurt hetzelfde.
 - ◊ Deze constructie is $O(n \lg n)$.
 - **Verwijderen.**
 - ◊ Een punt verwijderen zorgt ervoor dat een deelboom geen ouder meer heeft.
 - ◊ Om dit op te lossen worden alle punten in die deelboom opnieuw toegevoegd aan de boom.

3.3.2 PR quadtree

- Point-region quadtree.
- De zoekruimte **moet een rechthoek zijn**.
 - De zoekruimte kan gegeven worden.
 - De zoekruimte kan ook bepaald worden als de kleinste rechthoek die alle punten omvat.
- Elke knoop verdeelt de zoekruimte in vier **gelijke rechthoeken**.
- De opdeling loopt door tot dat elk deelgebied nog één punt bevat.
- Inwendige knopen bevatten geen punten.
- Woordenboekoperaties:
 - **Zoeken.**
 - ◊ De opeenvolgende punten vanuit de wortel worden gebruikt om de rechthoek te vinden waarna het punt zou moeten liggen.
 - **Toevoegen.**
 - ◊ Als de gevonden rechthoek geen punt bevat kan het punt toegevoegd worden.
 - ◊ Als de gevonden rechthoek wel een punt bevat, moet deze rechthoek opnieuw opgesplitst worden tot elk van de punten in een eigen gebied ligt.
 - **Verwijderen.**
 - ◊ Een punt verwijderen kan ervoor zorgen dat een deelgebied ledig wordt.
 - ◊ Als er nog slechts 1 punt zit in één van de vier deelgebieden, kunnen deze deelgebieden samengevoegd worden.
- De vorm van een PR quadtree is wel onafhankelijk van de toevoegvolgorde.
- Er is geen verband tussen de hoogte h en het aantal opgeslagen punten n omdat een PR quadtree nog steeds onevenwichtig kan uitvallen.
- Er is wel een verband tussen de hoogte h en de kleinste afstand a tussen twee zoekpunten.
 - Stel z de grootste zijde van de zoekruimte.
 - De grootste zijde van een gebied op diepte d is dan $\frac{z}{2^d}$.
 - De maximale afstand tussen twee punten in dat gebied is $\frac{z\sqrt{k}}{2^d}$ (de lengte van de diagonaal in dat gebied).
 - Op elke diepte d is

$$\frac{z\sqrt{k}}{2^d} \geq a$$

$$d \leq \lg\left(\frac{z}{a}\right) + \frac{\lg k}{2}$$

- De hoogte h is de maximale diepte van een inwendige knoop plus één:

$$h \leq \lg\left(\frac{z}{a}\right) + \frac{3}{2}$$

- Performantie:
 - **ToDo: ???**

3.4 K-d trees

- Vermijdt de grote vertakkingsgraad van een point quadtree door een binaire boom te gebruiken.
- Elke inwendige knoop bevat een punt, dat de deelzoekruimte slechts opsplitst in één dimensie.
- Opeenvolgende knopen gebruiken opeenvolgende dimensies om te splitsen.
- De opdeling kan doorgang tot slechts één punt in elk gebied is, of men kan vroeger stoppen en gelinkte lijsten bijhouden per gebied.
- Door de (eventueel random) afwisselende dimensies zijn er geen rotaties mogelijk om een dergelijke boom evenwichtig te maken. Daarom wordt verwijderen ook nooit echt gedaan, maar eerder met **lazy deletion**.
- Men kan wel af en toe een deelboom reconstrueren, en dan ook de te verwijderen knopen effectief verwijderen.

Hoofdstuk 4

Samenvoegbare heaps

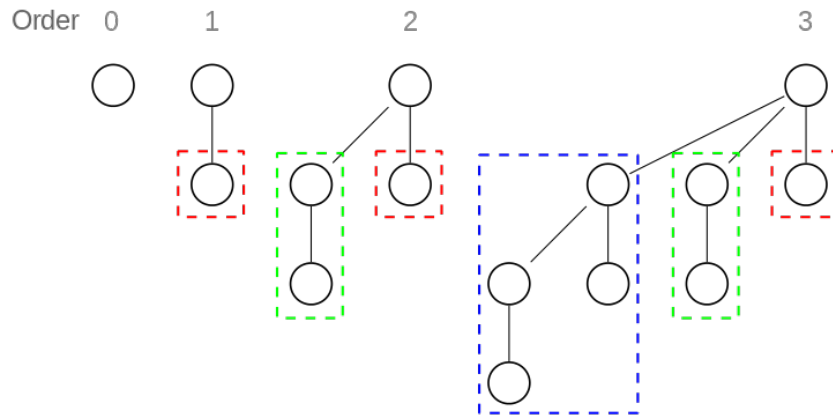
- Een samenvoegbare heap is een heap die geoptimaliseerd zijn om de 'join' operatie uit te voeren.
- De join operatie voegt twee heaps samen, zodat de **heapvoorwaarde** nog steeds geldig is.
- Een lijst van bekende heaps.
 - Leftist heaps.
 - ◊ Deze heaps proberen zo onevenwichtig mogelijk te zijn.
 - ◊ De linkerkant is diep en de rechterkant ondiep.
 - ◊ De operaties zijn efficiënt omdat al het werk in de rechterkant gebeurt.
 - Skew heaps.
 - ◊ Gelijkaardig aan een leftist heap, maar er is een vormbeperking.
 - ◊ In het slechtste geval kunnen individuele operaties $O(n)$ zijn.
 - Fibonacci heaps.
 - Relaxed heaps

De belangrijke samenvoegbare heaps zijn: **Binomial queues** en **Pairing heaps**.

4.1 Binomiale queues

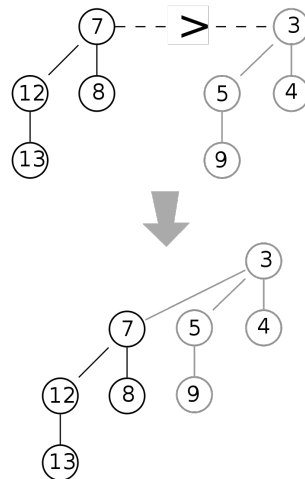
- Bestaat uit bos van binomiaalbomen.
- Binomiaalboom B_n bestaat uit twee binomiaalbomen B_{n-1} . B_0 bestaat uit één knoop.
- De tweede binomiaalboom is de meest linkse deelboom van de wortel van de eerste.
- Een binomiaalboom B_n bestaat uit een wortel met als kinderen B_{n-1}, \dots, B_1, B_0 (zie figuur 4.1)
- Op diepte d zijn er $\binom{n}{d}$ knopen.
- Voorbeeld: Een prioriteitswachtrij met 13 elementen wordt voorgesteld als $\langle B_3, B_2, B_0 \rangle$.

De operaties op een binomiaalqueue:



Figuur 4.1: Verschillende ordes van binomiaalbomen.

- **Minimum vinden:** Overloop de wortel van elke binomiaalboom. Het minimum kan ook gewoon bijgehouden worden.
- **Samenvoegen:** Tel de bomen met dezelfde hoogte bij elkaar op, $B_h + B_h = B_{h+1}$. Maak de wortel met de grootste sleutel het kind van deze met de kleinste.

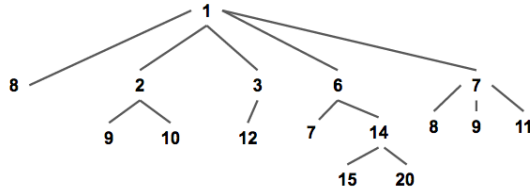


Figuur 4.2: Hier worden twee binomiaalbomen van orde 3 samengevoegd. De boom met de waarde 7 voor de wortel wordt het linkerkind van de boom met waarde 3 voor de wortel. Het wordt een boom van orde 4.

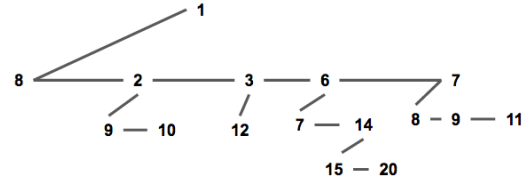
- **Toevoegen:** Maak een triviale binomialqueue met één knoop en voeg deze samen met de andere binomialqueue.
- **Minimum verwijderen:** Zoek binomialboom B_k met het kleinste wortelelement. Verwijder deze uit de binomialqueue. De deelbomen van deze binomialboom vormen een nieuw binomialbos die samengevoegd kan worden met de originele heap.

4.2 Pairing heaps

- Een algemene boom waarvan de sleutels voldoen aan de heapvoorwaarde.
- Elke knoop heeft een wijzer naar zijn linkerkind en rechterbroer (figuur 4.3 en 4.4). Als verminderen van prioriteit moet ondersteund worden, heeft elke knoop als linkerkind een wijzer naar zijn ouder en als rechterkind een wijzer naar zijn linkerkind.



Figuur 4.3: Een pairing heap in boomvorm.



Figuur 4.4: Een pairing heap.

De operaties op een pairing heap.

- **Samenvoegen:** Verlijk het wortelelement van beide heaps. De wortel met het grootste element wordt het linkerkind van deze met het kleinste element.
- **Toevoegen:** Maak een nieuwe pairingheap met één element, en voeg deze samen met de oorspronkelijke heap.
- **Prioriteit wijzigen:** De te wijzigen knoop wordt losgekoppeld, krijgt de prioriteitwijziging, en wordt dan weer samengevoegd met de oorspronkelijke heap.
- **Minimum verwijderen:** De wortel verwijderen levert een collectie van c heaps op. Voeg deze heaps van links naar rechts samen in $O(n)$ of voeg eerst in paren toe, en dan van rechts naar links toevoegen in geamortiseerd $O(\lg n)$.
- **Willekeurige knoop verwijderen:** De te verwijderen knoop wordt losgekoppeld, zodat er twee deelheaps ontstaan. Deze twee deelheaps worden samengevoegd.

Deel II

Grafen II

Hoofdstuk 5

Toepassingen van diepte-eerst zoeken

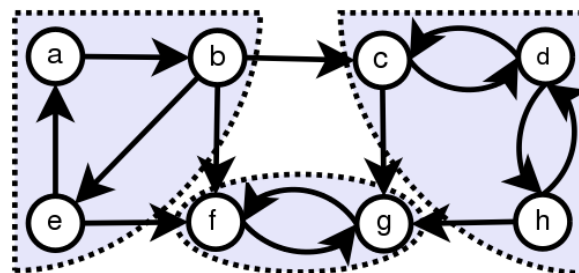
5.1 Enkelvoudige samenhang van grafen

5.1.1 Samenhangende componenten van een ongerichte graaf

- Een **samenhangende ongerichte graaf** is een graaf waarbij er een weg bestaat tussen elk paar knopen.
- Een **niet samenhangende ongerichte graaf** bestaat dan uit zo groot mogelijke samenhangende componenten.

5.1.2 Sterk samenhangende componenten van een gerichte graaf

- Een **sterk samenhangende gerichte graaf** is een graaf waarbij er een weg tussen elk paar knopen in beide richtingen (niet perse dezelfde verbindingen) bestaat (cfr. figuur 5.1).



Figuur 5.1: Een sterk samenhangende graaf.

- Een **zwak samenhangende gerichte graaf** is een graaf die niet sterk, maar toch samenhangend is indien de richtingen buiten beschouwing gelaten worden. Een graaf die niet sterk samenhangend is, bestaat uit zo groot mogelijke sterk samenhangende componenten.
- Sommige algoritmen gaan ervan uit de een graaf sterk samenhangend is. Men moet dus eerst deze componenten bepalen, meestal via een **componentengraaf** die:
 - een knoop heeft voor elk sterk samenhangend component,

- en een verbinding van knoop a naar knoop b indien er in de originele graaf een verbinding van één van de knopen van a naar één van de knopen van b is.
- De componentgraaf bevat geen lussen, anders wil dit zeggen dat die knoop zelf nog opgesplitst zou kunnen worden in twee sterk samenhangende componenten.
- De sterk samenhangende componenten kunnen bekomen worden met behulp van diepte-eerst zoeken (Kosaraju's Algorithm):
 1. Stel de omgekeerde graaf op, door de richting van elke verbinding om te keren.
 2. Pas diepte-eerst zoeken toe op deze omgekeerde graaf, waarbij de knopen in postorder genummerd worden.
 3. Pas diepte-eerst zoeken toe op de originele graaf, met als startknoop de resterende knoop met het hoogste postordernummer. Het resultaat is een diepte-eerst bos, waarvan de bomen sterk samenhangende componenten zijn.
- Diepte-eerst zoeken is $\Theta(n + m)$ voor ijle en $\Theta(n^2)$ voor dichte grafen. Het omkeren van de graaf is ook $\Theta(n + m)$ voor ijle en $\Theta(n^2)$ voor dichte grafen.

5.2 Dubbele samenhang van ongerichte grafen

Twee definities:

- **Brug.** Een brug is een verbinding dat, indien deze wordt weggenomen, de graaf in twee deelgrafen opsplijt. Een graaf zonder bruggen noemt men dubbel lijnsamenhangend; als er tussen elk paar knopen minstens twee onafhankelijke wegen bestaan, dan is een graaf zeker dubbel lijnsamenhangend.
- **Scharnierpunt.** Een scharnierpunt is een knoop dat, indien deze wordt weggenomen, de graaf in ten minste twee deelgrafen opsplijt. Een graaf zonder scharnierpunten noemt men dubbel knoopsamenhangend (of dubbel samenhangend). Een graaf met scharnierpunten kan onderverdeeld worden in dubbel knoopsamenhangende componenten. Als er tussen elk paar knopen twee onafhankelijke wegen bestaan, dan is de graaf dubbel knoopsamenhangend.

Scharnierpunten, dubbel knoopsamenhangende componenten, bruggen en dubbel lijnsamenhangende componenten kunnen opnieuw via diepte-eerst zoeken gevonden worden:

1. Stel de diepte-eerst boom op, waarbij de knopen in postorder genummerd worden.
2. Bepaal voor elke knoop u de laagst genummerde knoop die vanuit u kan bereikt worden via een weg bestaande uit nul of meer dalende boomtakken gevolgd door één terugverbinding.
3. Indien alle kinderen van een knoop op die manier een knoop kunnen bereiken die hoger in de boom ligt dan hemzelf, dan is de knoop zeker niet samenhangend. De wortel is een scharnierpunt indien hij meer dan één kind in heeft. _ToDo: hoe bruggen vinden?

Diepte-eerst zoeken is $\Theta(n + m)$ voor ijle en $\Theta(n^2)$ voor dichte grafen.

5.3 Eulergraaf

Een eulercircuit is een gesloten omloop in een graaf die alle verbindingen éénmaal bevat. Een eulergraaf is een graaf met een eulercircuit, die volgende eigenschappen heeft:

- De graaf is knoopsamenhangend.
- De graad van elke knoop is even.
- De verbindingen kunnen onderverdeeld worden in lussen, waarbij elke verbinding slechts behoort tot één enkel lus.

Hoofdstuk 6

Kortste afstanden II

6.1 Kortste afstanden vanuit één knoop

6.1.1 Algoritme van Bellman-Ford

Dit algoritme werkt voor verbindingen met negatieve gewichten, iets wat het algoritme van Dijkstra niet kon. Het algoritme is dan natuurlijk ook trager. (Dijkstra gebruikt het feit dat indien een pad naar $A \rightarrow C$ bestaat, er geen korter pad $A \rightarrow B \rightarrow C$ kan zijn, daarom is het algoritme performant, maar er mogen dus geen negatieve verbindingen zijn. Indien B negatief zou zijn dan klopt Dijkstra niet.).

- Werkt voor negatieve verbindingen.
- Geen globale kennis nodig van heel het netwerk, zoals bij Dijkstra, maar slechts enkel de burens van een bepaalde knoop. Daarom gebruiken routers Bellman-Ford (distance vector protocol).
- Zal niet stoppen indien er een negatieve lus in de graaf zit, aangezien het pad dan zal blijven dalen tot $-\infty$.

Het algoritme berust op een belangrijke eigenschap: Indien een graaf geen negatieve lussen heeft, zullen de kortste wegen evenmin lussen hebben en hoogstens $n - 1$ verbindingen bevatten. Hieruit kan een recursief verband opgesteld worden tussen de kortste wegen met maximaal k verbindingen en de kortste wegen met maximaal $k - 1$ verbindingen.

$$d_i(k) = \min(d_i(k-1), \min_{j \in V} (d_j(k-1) + g_{ij}))$$

met

- $d_i(k)$ het gewicht van de kortste weg met maximaal k verbindingen vanuit de startknoop naar knoop i ,
- g_{ij} het gewicht van de verbinding (j, i) ,
- $j \in V$ elke buur j van i .

Er bestaan twee goede implementaties:

1.
 - Niet nodig om in elke iteratie alle verbindingen te onderzoeken. Als een iteratie de voorlopige kortste afstand tot een knoop niet aanpast, is het zinloos om bij de volgende iteratie de verbindingen vanuit die knoop te onderzoeken.
 - Plaats enkel de knopen waarvan de afstand door de huidige iteratie gewijzigd werd in een wachtrij.
 - Enkel de burens van deze knopen worden in de volgende iteratie getest.
 - Elke buur moet, indien hij getest wordt en nog niet in de wachtrij zit, ook in de wachtrij gezet worden.
2.
 - Gebruik een deque in plaats van een wachtrij.
 - Als de afstand van een knoop wordt aangepast, en als die knoop reeds vroeger in de deque zat, danst voegt men vooraan toe, anders achteraan.
 - Kan in bepaalde gevallen zeer inefficiënt uitvallen.

6.2 Kortste afstanden tussen alle knopenparen

- Voor dichte grafen \rightarrow Floyd-Warshall (Algoritmen I).
- Voor ijle grafen \rightarrow Johnson.

6.2.1 Het algoritme van Johnson

- Maakt gebruik van Bellman-Ford en Dijkstra.
- Omdat we Dijkstra gebruiken, moet elk gewicht positief worden.
 1. Breidt de graaf uit met een nieuwe knoop s , die verbindingen van gewicht nul krijgt met elke andere knoop.
 2. Voer Bellman-Ford uit op de nieuwe graaf om vanuit s de kortste afstand d_i te bepalen tot elke originele knoop i .
 3. Het nieuwe gewicht \hat{g}_{ij} van een oorspronkelijke verbinding g_{ij} wordt gegeven door:

$$\hat{g}_{ij} = g_{ij} + d_i - d_j$$

- Het algoritme van Dijkstra kan nu worden toegepast op elke originele knoop, die alle kortste wegen zullen vinden. Om de kortste afstanden te bepalen moeten de originele gewichten opgeteld worden op deze wegen.
- Dit algoritme is $O(n(n+m) \lg n)$ want:
 - Graaf uitbreiden is $\Theta(n)$.
 - Bellman-Ford is $O(nm)$.
 - De gewichten aanpassen is $\Theta(m)$.
 - n maal Dijkstra is $O(n(n+m) \lg n)$. Dit is de belangrijkste term, al de andere termen mogen verwaarloosd worden.

6.3 Transitieve sluiting

Sluiting = algemene methode om één of meerdere verzamelingen op te bouwen. ('als een verzameling deze gegevens bevat, dan moet ze ook de volgende gegevens bevatten').

- **Fixed point:** Een sluiting wordt fixed point genoemd omdat op een bepaald moment verdere toepassing niets meer verandert, $f(x) = x$.
- **Least fixed point:** De kleinste x zoeken zodat $f(x) = x$ voldaan wordt.

Transitieve sluiting = 'Als (a, b) en (b, c) aanwezig zijn dan moet ook (a, c) aanwezig zijn.'

- Transitieve sluiting van een gerichte graaf is opnieuw een gerichte graaf, maar:
 - er wordt een nieuwe verbinding van i naar j toegevoegd indien er een weg bestaat van i naar j in de oorspronkelijke graaf.
- 3 algoritmen:
 1. **Diepte-of breedte-eerst zoeken:**
 - Spoor alle knopen op die vanuit een startknoop bereikbaar zijn en herhaal dit met elke knoop.
 - Voor ijle grafen $\rightarrow \Theta(n(n+m))$.
 - Voor dichte grafen $\rightarrow \Theta(n^3)$.
 2. **Met de componentengraaf:**
 - Interessant wanneer men verwacht dat de transitieve sluiting een dichte graaf zal zijn, want dan zijn veel knopen onderling bereikbaar, zodat er veel sterk samenhangende componenten zijn. Die kunnen in $\Theta(n+m)$ bepaald worden.
 - Maak dan de componentengraaf (kan in $O(n+m)$).
 - Als nu blijkt dat component j beschikbaar is vanuit component i , dan zijn alle knopen van j bereikbaar vanuit knopen van i .
 3. **Het algoritme van Warshall:**
 - Maak een reeks opeenvolgende $n \times n$ matrices $T^{(0)}, T^{(1)}, \dots, T^{(n)}$ die logische waarden bevat.
 - Element $t_{ij}^{(k)}$ duidt aan of er een weg tussen i en j met mogelijke intermediaire knopen $1, 2, \dots, k$ bestaat.
 - Bepalen opeenvolgende matrices:

$$t_{ij}^{(0)} = \begin{cases} \text{onwaar} & \text{als } i \neq j \text{ en } g_{ij} = \infty \\ \text{waar} & \text{als } i = j \text{ of } g_{ij} < \infty \end{cases}$$

en

$$t_{ij}^{(k)} = t_{ij}^{(k-1)} \text{ OF } (t_{ik}^{(k-1)} \text{ EN } t_{kj}^{(k-1)}) \quad \text{voor } 1 \leq k \leq n$$

$T^{(n)}$ is de gezochte burenmatrix.

Hoofdstuk 7

Stroomnetwerken

- Eigenschappen van een **stroomnetwerk**:
 - Is een gerichte graaf.
 - Heeft twee speciale knopen:
 1. Een **producent**.
 2. Een **verbruiker**.
 - Elke knoop van de graaf is bereikbaar vanuit de producent.
 - De verbruiker is vanuit elke knoop bereikbaar.
 - De graaf mag lussen bevatten.
 - Elke verbinding heeft een capaciteit.
 - Alles wat in een knoop toestroomt, moet ook weer wegstromen. De stroom is dus **conservatief**.

7.1 Maximalestroomprobleem

- Zoveel mogelijk materiaal van producent naar verbruiker laten stromen, zonder de capaciteiten van de verbindingen te overschrijden.
- Wordt opgelost via de methode van **Ford-Fulkerson**.
 - Iteratief algoritme.
 - Bij elke iteratie neemt de nettostroom vanuit de producent toe, tot het maximum bereikt wordt.
- Elke verbinding (i, j) heeft:
 - een capaciteit $c(i, j)$;
 - ◊ Als er geen verbinding is tussen twee knopen, dan wordt er toch een verbinding gemaakt met capaciteit 0. Dit dient om wiskundige notaties te vereenvoudigen.
 - de stroom $s(i, j)$ die er door loopt, waarbij $0 \leq s(i, j) \leq c(i, j)$.
- De totale nettostroom f van alle knopen K in de graaf is dan

$$f = \sum_{j \in K} (s(p, j) - s(j, p))$$

- $s(p, j)$ is de uitgaande stroom vanuit de producent p naar knoop j .
 - $s(j, p)$ is de totale inkomende stroom van elke knoop j naar producent p (komt bijna nooit voor maar just in case).
- De verzameling van stromen voor alle mogelijke knopenparen in beide richtingen wordt een **stroomverdeling** genoemd.
- De verzameling mogelijke stroomtoename tussen elk paar knopen wordt het **restnetwerk** genoemd.
 - Het restnetwerk bevat dezelfde knopen, maar niet noodzakelijk dezelfde verbindingen en capaciteiten.
 - In het restnetwerk wordt de **vergrotende weg** gezocht.
 - Als er geen vergrotende weg is dan zal de networkstroom maximaal zijn.
 - Voor elk mogelijke stroomverdeling bestaat er een overeenkomstig restnetwerk.

Deel III

Strings

Hoofdstuk 8

Gegevensstructuren voor strings

8.1 Inleiding

- Efficiënte gegevensstructuren kunnen een zoek sleutel lokaliseren door elementen één voor één te testen.
- Dit heet **radix search**.
- Meerdere soorten boomstructuren die radix search toepassen.
- ! Veronderstel dat geen enkele sleutel een prefix is van een ander.
De sleutels **test** en **testen** zullen dus nooit samen voorkomen in de boom aangezien **test** een prefix is van **testen**.

8.2 Digitale zoekbomen

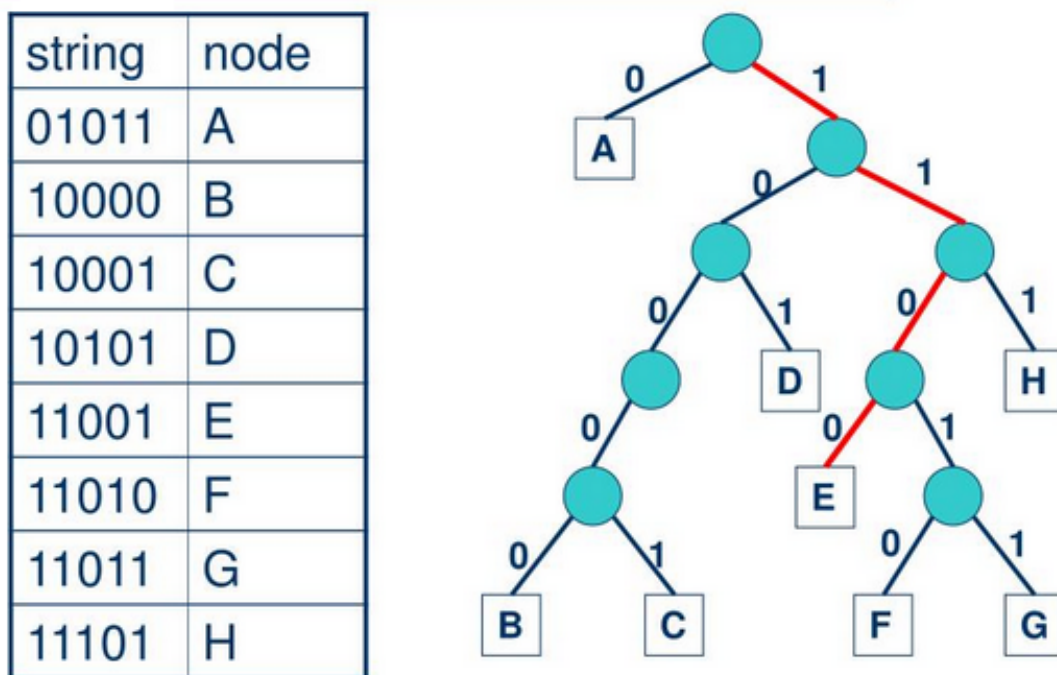
- Sleutels worden opgeslagen in de knopen.
- Zoeken en toevoegen verloopt analoog.
- Slechts één verschil:
 - De juiste deelboom wordt niet bepaald door de zoek sleutel te vergelijken met de sleutel in de knoop.
 - Wel door enkel het volgende element (van links naar rechts) te vergelijken.
 - Bij de wortel wordt het eerste sleutelement gebruikt, een niveau dieper het tweede sleutelement, enz.
- Hier zijn de sleutelementen beperkt tot bits → **binaire digitale zoekbomen**.
- Bij een knoop op diepte i wordt bit $(i + 1)$ van de zoek sleutel gebruikt om af te dalen in de juiste deelboom.
- ! De zoek sleutels zijn niet noodzakelijk in volgorde van toevoegen.
 - Sleutels in de linkerdeelboom van een knoop op diepte i zijn kleiner dan deze in de rechterdeelboom, maar **ToDo: wat?**
- De hoogte van een digitale zoekboom wordt bepaald door het aantal bits van de langste sleutel.

- Performantie is vergelijkbaar met rood-zwarte bomen:
 - Voor een groot aantal sleutels met relatief kleine bitlengte is het zeker beter dan een binaire zoekboom en vergelijkbaar met die van een rood-zwarte boom.
 - Het aantal vergelijkingen is trouwens nooit meer dan het aantal bits van de zoeksleutel.
- ✓ Implementatie van een digitale zoekboom is eenvoudiger dan die van een rood-zwarte boom.
- ! De beperkende voorwaarde is echter dat er efficiënte toegang nodig is tot de bits van de sleutels.

8.3 Tries

- Een digitale zoekstructuur die wel de volgorde van de opgeslagen sleutels behoudt.

8.3.1 Binaire tries



Figuur 8.1: Een voorbeeld van een binaire trie met opgeslagen sleutels A , B , C , D , E , F , G en H . Elk van deze sleutels heeft een (willekeurige) bitrepresentatie die de individuele elementen van de sleutels voorstelt. De zoekweg van de sleutel E wordt aangegeven door rode verbindingen.

- Zoekweg wordt bepaald door de opeenvolgende bits van de zoeksleutel.
- Sleutels worden enkel opgeslaan in de bladeren.
 - De boom *inorder* overlopen geeft de sleutels gerangschikt terug.
 - De zoeksleutel moet niet meer vergeleken worden met elke knoop op de zoekweg.

- Twee mogelijkheden bij **zoeken** en **toevoegen**:
 1. Indien een lege deelboom bereikt wordt, bevat de boom de zoeksleutel niet. De zoeksleutel kan dan in een nieuw blad op die plaats toegevoegd worden.
 2. Anders komen we in een blad. De sleutel in dit blad **kan** eventueel gelijk zijn aangezien ze zeker dezelfde beginbits hebben.
 - Als we bijvoorbeeld **testen** zoeken maar de boom bevat enkel de sleutel **test**, zullen we in het blad met de sleutel **test** uitkomen aangezien de eerste 4 elementen hetzelfde zijn. De sleutels zijn echter niet gelijk.
 - Indien de sleutels niet hetzelfde zijn, zijn er terug twee mogelijkheden:
 - (a) **Het volgende bit verschilt.** Het blad wordt vervangen door een knoop met twee kinderen die de twee sleutels bevat.
 - (b) **Een reeks van opeenvolgende bits is gelijk.** Het blad wordt vervangen door een reeks van inwendige knopen, zoveel als er gemeenschappelijke bits zijn. Bij het eerste verschillende krijgen we terug het eerste geval.
- ! Wanneer opgeslagen sleutels veel gelijke bits hebben, zijn er veel knopen met één kind.
 - Het aantal knopen is dan ook hoger dan het aantal sleutels.
 - Een trie met n gelijkmatige verdeelde sleutels heeft gemiddeld $n / \ln 2 \approx 1.44n$ inwendige knopen.
- De structuur is onafhankelijk van de toevoegvolgorde van de sleutels.
- De sleutels in de zoekweg worden enkel getest op de bit die op dat niveau van toepassing is.

8.3.2 Meerwegstries

- Heeft als doel de hoogte van een trie met lange sleutels te beperken.
- Meerdere sleutelbits in één enkele knoop vergelijken.
- Een sleutelelement kan m verschillende waarden aannemen, zodat elke knoop (potentiaal) m kinderen heeft $\rightarrow m$ -wegsboom.

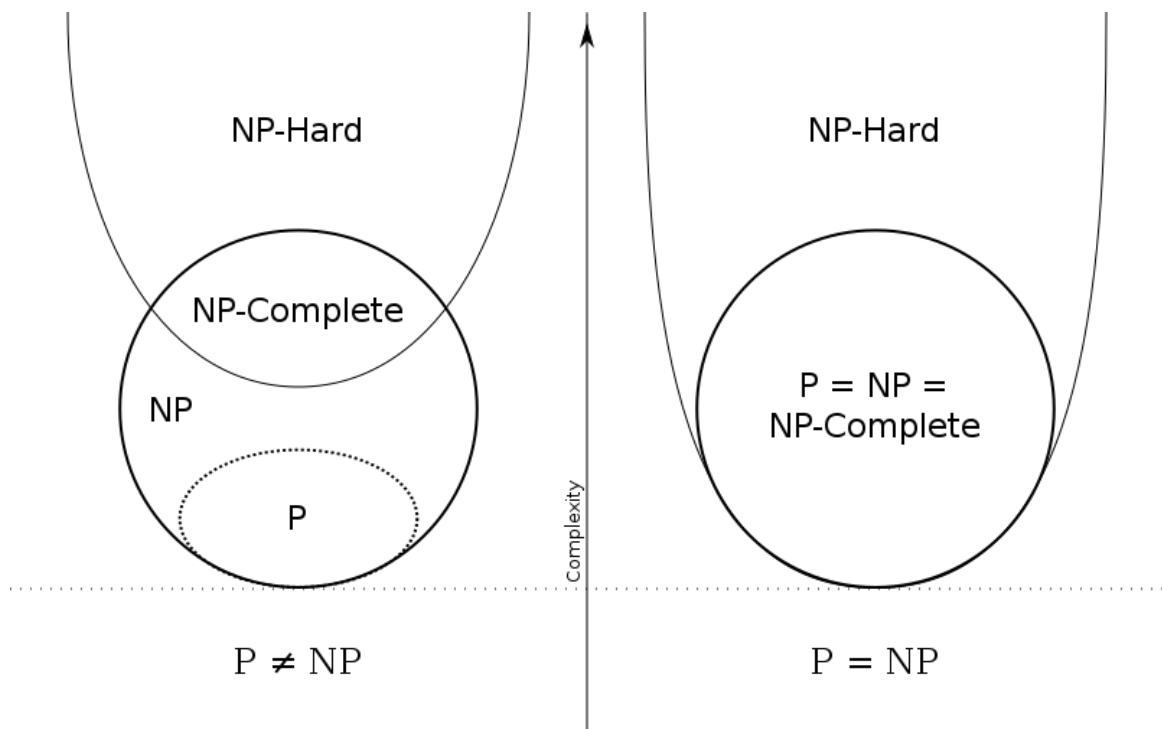
Deel IV

Hardnekkige problemen

Hoofdstuk 9

NP

9.1 Complexiteit: P en NP



Figuur 9.1: De linkse deelfiguur toont de verschillende complexiteitsklassen indien $P \neq NP$. De rechtse deelfiguur toont hetzelfde indien $P = NP$.

- Alle besproken algoritmen hadden een efficiënte oplossing.
- Hun uitvoeringstijd wordt begrensd door een **veelterm** zoals $O(n^2)$ of $O(n^2m)$.
- Sommige problemen hebben geen efficiënte oplossing.
- Problemen worden onderverdeeld in **complexiteitsklassen**.
 - Beperking tot **beslissingsproblemen**, waarbij de uitvoer *ja* of *nee* is.

- Niet echt een beperking omdat elk probleem als een beslissingsprobleem kan geformuleerd worden.

9.1.1 Complexiteitsklassen

- De klasse **P** (**P**olynomialiaal) bevat alle problemen waarvan de uitvoeringstijd begrensd wordt door een veelterm.
 - Op een realistisch computermodel.
 - ◇ Heeft een polynomiale bovengrens voor het werk dat in één tijdseenheid kan verricht worden.
 - Met een redelijke voorstelling van de invoergegevens (geen overbodige informatie, compact, ...).
 - Al de problemen in **P** worden als efficiënt oplosbaar beschouwd.
 - ! Waarom een veelterm? $O(n^{100})$ kan nauwelijks efficiënt genoemd worden.
 1. Meestal is de graad van de veelterm beperkt tot twee of drie.
 2. Veeltermen vormen de kleinste klasse functies die kunnen gecombineerd worden, en opnieuw een veelterm opleveren.
 - ◇ Men noemt dit een **gesloten klasse**.
 - ◇ Efficiënte algoritmen voor eenvoudigere problemen kunnen dus gecombineerd worden tot een efficiënt algoritme voor een complex probleem.
 3. De efficiëntiemaat blijft onafhankelijk van het computermodel.
- De klasse **NP** (**N**iet-deterministisch **P**olynomialiaal) bevat alle problemen die door een niet-deterministische computer in polynomiale tijd kunnen opgelost worden en waarvan de oplossing kan gecontroleerd worden in polynomiale tijd.
 - Een niet-deterministische computer bevat hypothetisch een oneindig aantal processoren, waarvan er op tijdstap t , er k kunnen aangesproken van worden. De processoren werken niet samen, maar kunnen wel hun deel van het probleem oplossen.
 - Elk probleem uit **P** behoort tot **NP**.
 - Niet geweten of er probleem in **NP** zit die niet tot **P** behoort \rightarrow **P** vs **NP** probleem (Figuur 9.1).
 - Wel geweten dat er problemen zijn die niet in **NP** zitten, en dus ook niet in **P**.
- De klasse **NP-hard** bevat alle problemen die minstens even zwaar zijn als elk **NP**-probleem.
 - Een probleem X dat gereduceerd kan worden naar een probleem Y betekent dat Y minstens even zwaar is als X .
- De klasse **NP-compleet** bevat alle problemen die **NP-hard** zijn, maar toch nog in **NP** zitten.
 - Als er één **NP-compleet** probleem bestaat die efficiënt oplosbaar zou zijn (en dus in **P** behoort), dan zouden alle problemen uit **NP** ook efficiënt oplosbaar zijn, zodat **P** = **NP**.
 - NP-complete problemen kunnen op verschillende manieren aangepakt worden:
 - ◇ Backtracking en snoeien.
 - ◇ Speciale gevallen oplossen met efficiënte algoritmen.
 - ◇ Het kan zijn dat de gemiddelde uitvoeringstijd toch goed is.
 - ◇ Gebruik een benaderend algoritme.
 - ◇ Maak gebruik van heuristieken.

9.2 NP-complete problemen

- Overzicht van belangrijke NP-complete (optimalisatie)problemen.
- Om na te gaan of een probleem NP-compleet is, moet het herleid kunnen worden naar een basisvorm.

9.2.1 Het basisprobleem: SAT (en 3SAT)

- Gegeven:
 - Een verzameling logische variabelen $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_{|\mathcal{X}|}\}$.
 - Een verzameling logische uitspraken $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_{|\mathcal{F}|}\}$.
 - Elke uitspraak bestaat uit automatische uitspraken (atomen) samengevoegd met OF-operaties:

$$f_1 = x_2 \vee \overline{x_5} \vee x_7 \vee x_8$$

- Gevraagd:
 - Hoe moeten de waarden toegekend worden aan de variabelen uit \mathcal{X} zodat elke uitspraak in \mathcal{F} waar is?
- Elk NP-compleet probleem is reduceerbaar tot SAT.
- Een uitspraak met meer dan drie atomen kan herleidt worden naar een reeks uitspraken met elk drie atomen:

$$\begin{aligned} f_1 &= x_2 \vee \overline{x_5} \vee x_n \\ f'_1 &= \overline{x_n} \vee x_7 \vee x_8 \end{aligned}$$

9.2.2 Vertex Cover

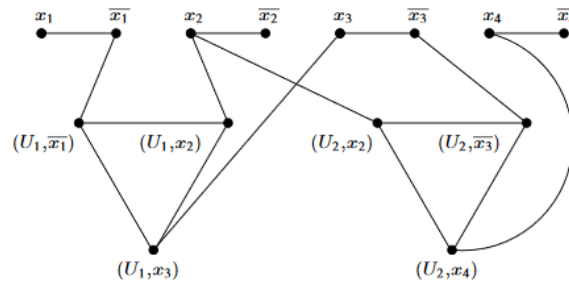
- Gegeven:
 - Een ongerichte graaf.
- Gevraagd:
 - Hoe kan de kleinste groep knopen bepaald worden die minstens één eindknoop van elke verbinding bevat.
- Voorbeeld:
 - 3SAT kan gereduceerd worden tot vertex cover.
 - ◊ Voor elke logische variabele x_i worden er twee knopen gemaakt: voor x_i en $\overline{x_i}$. Deze knopen zijn verbonden.
 - ◊ Voor elke uitspraak worden er drie knopen gemaakt, één voor elk atoom. Deze drie knopen worden verbonden. Elk atoom wordt ook verbonden met de knopen voor de individuele logische variabelen.
 - Voor elke logische variabele moet zeker één van de twee knopen opgenomen worden.
 - Voor elke uitspraak moeten zeker twee van de drie knopen opgenomen worden.
 - Minstens $|\mathcal{X}| + 2|\mathcal{F}|$ knopen.

- Stel volgende uitspraken

$$U_1 = \bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3$$

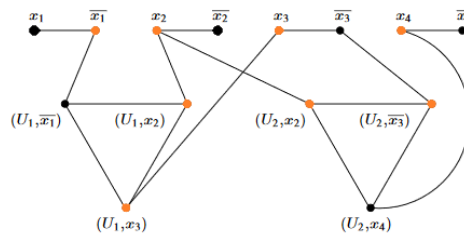
$$U_2 = x_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4$$

Bijhorende graaf:



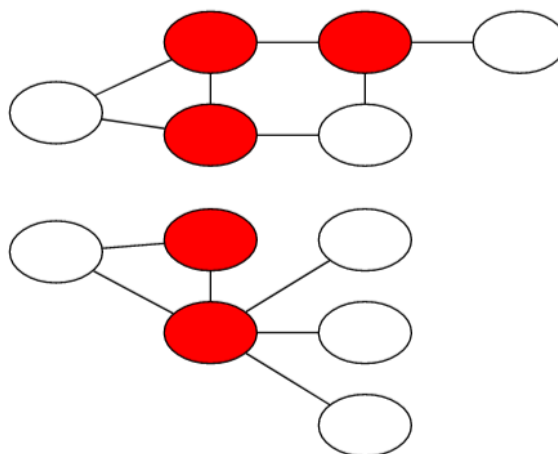
Figuur 9.2: Een graaf voor het 3SAT-probleem.

Voorbeeld van een minimale vertex cover:



Figuur 9.3: Een minimale vertex cover van de graaf op figuur 9.2

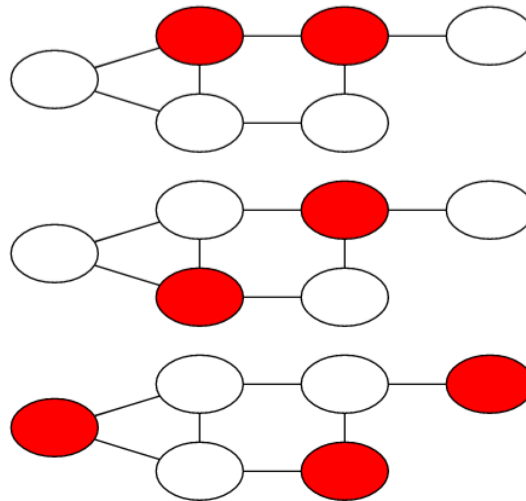
- Andere voorbeelden van minimale vertex covers:



Figuur 9.4: De minimale vertex cover van twee verschillende grafen.

9.2.3 Dominating set

- Gegeven:
 - Een ongerichte graaf.
- Gevraagd:
 - Een kleinste groep knopen zodat elke andere knoop met minstens een van de knopen uit de groep verbonden is.
- Voorbeelden:



Figuur 9.5: Voorbeelden van dominating sets.

9.2.4 Graph Coloring

9.2.5 Clique

9.2.6 Independent set

9.2.7 Hamilton path

9.2.8 Minimum cover

9.2.9 Subset sum

- Gegeven:
 - Een verzameling elementen met elk een positieve gehele grootte.
 - Een positief geheel getal k .
- Gevraagd:
 - Een deelverzameling van die elementen, zodat de som van hun grootten gelijk is aan k .

9.2.10 Partition

9.2.11 TSP

9.2.12 Longest path

9.2.13 Bin packing

9.2.14 Knapsack

Hoofdstuk 10

Metaheuristieken

- **Heuristieken** zijn vuistregels bij het zoeken naar een oplossing van een probleem.
- Garanderen niet dat er een oplossing gevonden wordt, maar versnelt wel de zoektocht ernaar.

10.1 Combinatorische optimalisatie

- Abstracte representatie van de problemen nodig.
 - Het zijn **optimalisatie**-problemen.
 - Voor een verzameling \mathcal{S} moet de beste gekozen worden.
 - De verzameling \mathcal{S} is een eindige verzameling van strings over een eindig alfabet.
 - Het beste individu wordt bepaald door een evaluatiefunctie f .
 - De beste waarde komt overeen met de kleinste waarde voor f .