

Aufgabe 5: Rominos

Team-ID: 00587

Team-Name: Doge.NET

Bearbeiter dieser Aufgabe:
Nikolas Kilian & Johannes von Stoephasius

24. November 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Lösungsidee	1
1.1	Definitionen	1
1.2	Kernidee	2
1.2.1	Beispiel	2
1.3	Hinzufügen von Blöcken	2
1.3.1	Beispiel	3
1.4	Eliminierung von Duplikaten	3
1.4.1	Beispiel	3
1.4.2	Verschiebung	4
1.4.3	Rotation und Spiegelung	4
1.4.4	Endgültige Duplikat-Eliminierung	5
2	Umsetzung	6
2.1	Vector2Int	6
2.2	BitBuffer512	6
2.3	Romino	6
3	Beispiele	6
3.1	Anzahl aller Rominos (2-10)	7
3.2	Alle Rominos (2-5)	7
3.2.1	Rominos mit Größe 2	7
3.2.2	Rominos mit Größe 3	7
3.2.3	Rominos mit Größe 4	7
3.2.4	Rominos mit Größe 5	8
4	Quellcode	11

1 Lösungsidee

1.1 Definitionen

Romino Eine Ansammlung von Blöcken auf einem 2D Integer-Gitter nach den Regeln der Aufgabe.

Block Eine Position auf dem 2D Gitter, die einem Romino angehört.

Blocksadditionsmöglichkeit Eine Blocksadditionsmöglichkeit eines Rominos ist eine Position im 2d-Gitter, wo in zukünftigen Schritten ein neuer Block angefügt werden kann.

In den Grafiken als grauer Kreis dargestellt.

(echte) Diagonale Die (echte) Diagonale ist die in der Aufgabenstellung beschriebene diagonale Verbindung zweier Blöcke mit zwei fehlenden Blöcken.

geschützte Diagonale Die geschützte Diagonale ist die echte Diagonale die immer geschützt wird.

In den Grafiken sind die von der geschützten Diagonale geschützten Blöcke als kleine weiße/schwarze Punkte dargestellt.

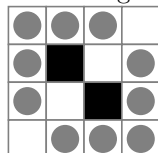
1.2 Kernidee

Rominos mit n Blöcken können gefunden werden, indem zu Rominos mit $n - 1$ Blöcken ein Block angefügt wird. Hierbei muss beachtet werden, dass der Rominostein zusammenhängend bleiben muss und dass mindestens eine Diagonale bleiben muss.

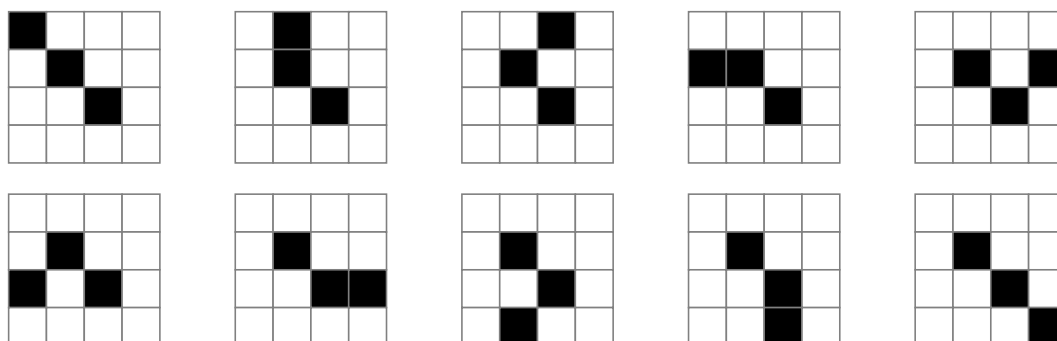
Um alle möglichen Rominos mit n Blöcken zu finden, muss man also alle Rominos mit $n - 1$ Blöcken finden, und für diese alle Rominos die durch Hinzufügen eines weiteren Blocks entstehen können, ermitteln. Dabei wird es Duplikate geben. Eliminiert man diese, hat man alle möglichen n -Rominos eindeutig gefunden.

1.2.1 Beispiel

Nehme man beispielsweise das 2er-Romino, kann man zum Finden aller 3(= 2 + 1)er - Rominos wie folgt Blöcke anfügen:



Somit ergeben sich folgende 3er-Rominos:



Da Rominos mindestens zwei Steine haben müssen, um eine Diagonale zu besitzen, ist der Rominostein mit den wenigsten Blöcken eine 2er Diagonale.



Kleinstes Rominostein

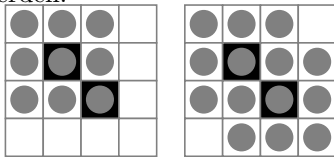
Um alle n -Rominos für ein beliebiges n zu finden, würde man den obigen Algorithmus verwenden, um aus dem 2er-Romino alle 3er-Rominos zu folgern, dann aus diesen alle 4er-Rominos etc., bis man alle n -Rominos errechnet hat.

1.3 Hinzufügen von Blöcken

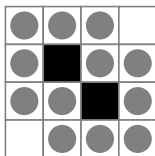
Bei Rominos werden konstant die Blocksadditionsmöglichkeiten verfolgt, also die Positionen, wo Blöcke angefügt werden können, sodass das Romino zusammenhängend bleibt. Hierfür werden die Nachbarn jedes Blocks des Rominos ermittelt, daraufhin werden Duplikate und bereits belegte Blöcke eliminiert.

1.3.1 Beispiel

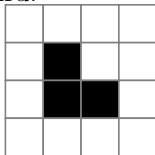
Nehme man beispielsweise wieder das 2er-Romino, würden die Nachbarn aller Blöcke wie folgt ermittelt werden:



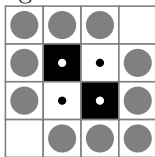
Nach Entfernen bereits existierender Blöcke von den Blocksadditionsmöglichkeit ergibt sich:



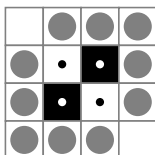
Es lässt sich hier erkennen, dass die Existenz einer echten Diagonale nicht zwingend aufrecht erhalten wird:



Um dafür zu sorgen, dass diese echte Diagonale immer existiert, wird eine spezifische Diagonale immer geschützt. Bei den möglichen Blockadditionen beim 2er-Romino beispielsweise würden hierfür die für die Diagonale relevanten Blöcke aus den Blockadditionsmöglichkeiten entfernt:



Diese 4 geschützten Blöcke werden auch bei Spiegelungen, Verschiebungen und Rotationen mitverfolgt, sodass diese eine Diagonale immer besteht:

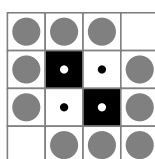


1.4 Eliminierung von Duplikaten

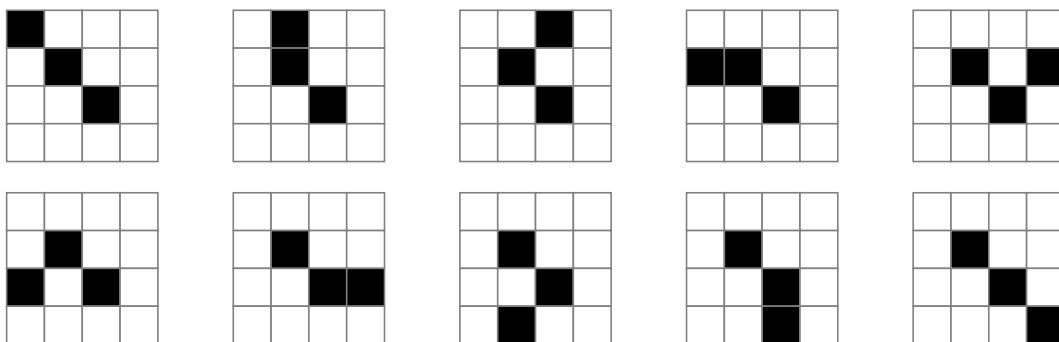
Zur Eliminierung von Duplikaten werden die Rominos zuerst eindeutig orientiert, um Vergleiche zwischen gleichen, aber transformierten Rominos zu erleichtern.

1.4.1 Beispiel

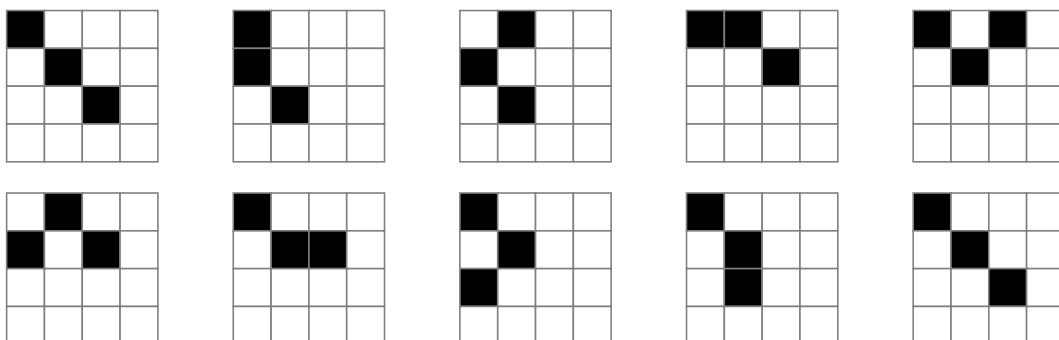
Im folgenden wird ein Beispiel für die Schritte fortgeführt. Die Ausgangssituation des Beispiels ist wie folgt:



Ausgangsromino

Mögliche Rominos**1.4.2 Verschiebung**

Die Verschiebung wird eliminiert durch Verschiebung des Rominos in die linke obere Ecke des Gitters; also wird der Block mit der geringsten x -Koordinate auf $x = 0$ verschoben, und der Block mit der geringsten y -Koordinate auf $y = 0$.

Am Beispiel**1.4.3 Rotation und Spiegelung**

Um Rotation und Spiegelung eines Rominos zu eliminieren, werden zuerst all seine Permutationen (also alle Kombinationen von Rotation und Spiegelung) ermittelt, denen jeweils ein eindeutiger Wert zugewiesen wird. Daraufhin wird das Romino mit dem höchsten dieser eindeutigen Werte ausgewählt. Hierbei ist es egal, ob der niedrigste oder höchste Wert genommen wird, solange das Ergebnis eindeutig ist.

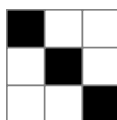
Zur Bestimmung dieses eindeutigen Werts haben wir einen trivialen Algorithmus verwendet wie folgt:

1. Nehme einen Block b aus der Permutation des Rominos.
2. Seien die Koordinaten (x, y) die Koordinaten des Blocks b , wobei die minimale x -Koordinate und die minimale y -Koordinate aus allen Blöcken der Permutation 0 ist.
3. Man weise dem Block b den Wert $2^{(y * \text{Anzahl an Blöcken}) + x}$ zu. Andersgesagt setze man die $((y * \text{Anzahl an Blöcken}) + x)$ -te Ziffer des Wertes als Binärzahl auf Eins. Diese Formel ergibt sich, da sie für jede Position im Gitter einen eindeutigen Wert hat. Hierbei kann es nicht sein, dass eine Kollision entstehen kann, da ein Romino nicht aus einem Gitter der Größe $< \text{Anzahl an Blöcken} > \times < \text{Anzahl an Blöcken} >$ herauswachsen kann.
4. Der Wert der Permutation ist nun die Summe aller Werte aller Blöcke der Permutation.

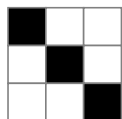
Es wird quasi der Block als Maske für folgende Werte verwendet:

2^0	2^1	2^2
2^3	2^4	2^5
2^6	2^7	2^8

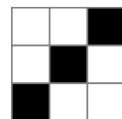
Am Beispiel Ausgehend von dem Romino



werden folgende Permutationen festgestellt:



Permutation 1



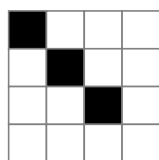
Permutation 2

$$Wert_1 = 2^0 + 2^4 + 2^8 = 273$$

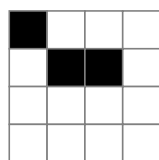
$$Wert_2 = 2^2 + 2^4 + 2^6 = 84$$

Hierbei ist $Wert_2 = 84 < 273 = Wert_1$. Da Permutation 1 mit $Wert_1$ den höchsten Wert hat, wird Permutation 1 als die eindeutige Rotierung festgelegt.

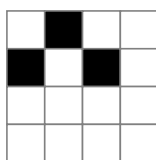
Analog auf alle Rominos angewendet ergibt sich:



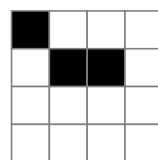
273



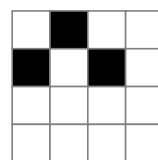
49



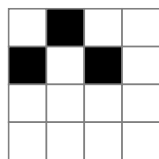
42



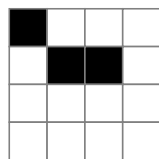
49



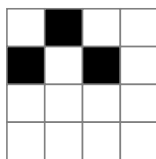
42



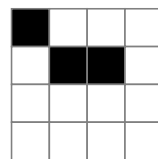
42



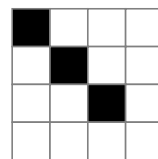
49



42



49

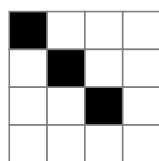


273

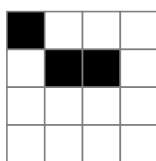
1.4.4 Endgültige Duplikat-Eliminierung

Zum endgültigen Eliminieren der Duplikate werden zuerst alle Rominos wie oben beschrieben orientiert, dann werden die eindeutigen Werte dieser Rominos verglichen, um schnell Gleichheit zu ermitteln. Durch Verwendung dieser Vergleichsmethode lassen sich schnell Duplikate entfernen.

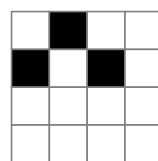
Am Beispiel Nun lassen sich trivialerweise die Duplikate eliminieren:



273

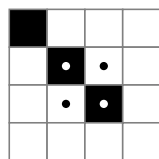


49

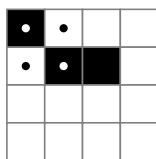


42

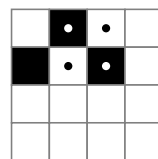
Über den gesamten Prozess hinweg wird auch die geschützte Diagonale mitverfolgt. Bei den 3er-Rominos ist sie wie folgt platziert:



273



49



42

2 Umsetzung

Zur Umsetzung haben wir den obigen Algorithmus in C# 8.0 mit .NET Core 3.0 implementiert. Die Rominos werden in Instanzen von `readonly struct Romino` gespeichert. Das `struct` beinhaltet:

1. `Vector2Int[] Blocks` - Das Array mit allen Blöcken des Rominos.
2. `List<Vector2Int> PossibleExtensions` - Die Liste mit allen Block-Additionsmöglichkeiten. Hierbei ist zu bemerken, dass die Größe der Liste konstant bleibt; es wird hier eine Liste statt einem Array verwendet, da bei der Erstellung die Größe unbekannt ist, und die Konvertierung zum Array unnötig Rechenzeit kosten würde.
3. `Vector2Int DiagonalRoot` - Die linke obere Ecke der geschützten Diagonale.
4. `Vector2Int Max` - Die rechte untere Ecke des Rominos. Verwendet für die Korrektur der Verschiebung ohne über alle Blöcke zu iterieren,
5. `BitBuffer512 _uniqueCode` - Der eindeutige Wert, errechnet wie in Abschnitt 1.4.3.

Die Hauptmethode ist die statische Methode `IEnumerable<(int Size, List<Romino> Rominos)> Romino.GetRominosUntilSize(int size)`, welche für eine gegebene Größe alle Rominos aller Größen bis zu dieser Größe ausgibt. Diese ruft intern parallelisiert für alle Rominos aus einer Generation die Methode `IEnumerable<Romino> Romino.AddOneNotUnique()` auf. Diese Methode errechnet nach dem Verfahren aus Abschnitt 1.3 die Rominos der nächsten Generation. Danach werden nach dem Verfahren aus Abschnitt 1.4 die Duplikate entfernt.

Die eindeutigen Werte aus Abschnitt 1.4.3 werden hierbei berechnet, ohne dass der Romino modifiziert wird. Alle Modifikationen, die an dem Romino gemacht werden müssten, um den Wert einer Permutation zu bestimmen, werden beim Orientieren direkt in der Ausrechnung des eindeutigen Werts angewendet, ohne das Romino zu modifizieren. Erst wenn die eindeutige Rotation nach Abschnitt 1.4 gefunden wurde, wird das Romino so modifiziert, dass es als diese Permutation dargestellt wird.

2.1 Vector2Int

`readonly struct Vector2Int` ist ein 2-dimensionaler Vector von `System.Int32`.

2.2 BitBuffer512

`struct BitBuffer512` hält 512 Bits an Daten, wobei die individuellen Bits mit dem Indexer `BitBuffer512[int bitIndex]` gelesen und geschrieben werden können.

Weiterdem überlädt `BitBuffer512` Vergleichsoperatoren, die 2 Instanzen wie eine 512-stellige unsigned Binärzahlen vergleicht. Das struct wird zum Speichern des eindeutigen Werts aus Abschnitt 1.4.3 verwendet, da der größte vorimplementierte Zahlentyp, `ulong`, bereits mit 8er-Rominos komplett gefüllt wird. Im Vergleich kann `BitBuffer512` Rominos von bis zu 22 Blöcken speichern.

2.3 Romino

`readonly struct Romino` ist das Her(t)zstück des Codes; es speichert ein Romino ab, mit den in Abschnitt 2 benannten Feldern. Dabei ist das gesamte struct `readonly`, und auch die Listen/Arrays werden, auch wenn dies nicht explizit versichert ist, nie modifiziert, nach dem der Konstruktor durchgelaufen ist. Der Konstruktor orientiert hier das Romino nach dem Verfahren aus Abschnitt 1.4.

3 Beispiele

Für mehr Info zu den Parametern des Programms führen sie `Rominos.CLI --help` aus.

3.1 Anzahl aller Rominos (2-10)

Ergebnisse für `Rominos.CLI --size 10 --stopwatch`

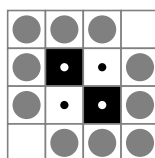
```
Starting
2 done - 1
3 done - 3
4 done - 17
5 done - 82
6 done - 489
7 done - 2924
8 done - 18406
9 done - 116883
10 done - 753905
Done 9370ms
```

3.2 Alle Rominos (2-5)

Ergebnisse für `Rominos.CLI --size 5 --latex --highlightPossibleExtensions --highlightDiagona`

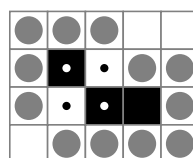
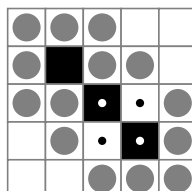
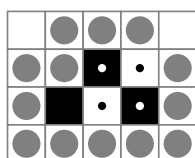
3.2.1 Rominos mit Größe 2

Es gibt insgesamt 1 Romino mit Größe 2.



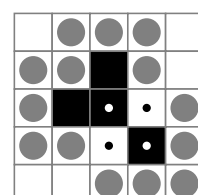
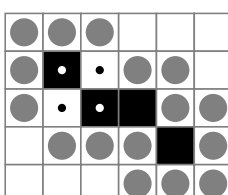
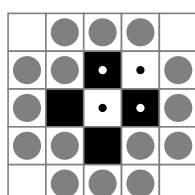
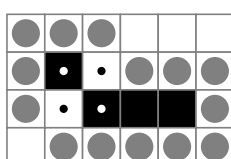
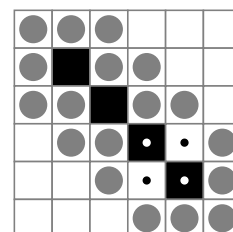
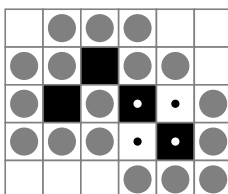
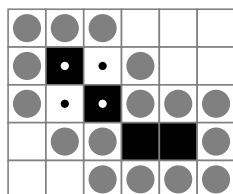
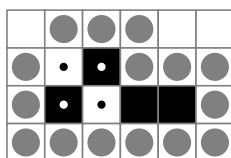
3.2.2 Rominos mit Größe 3

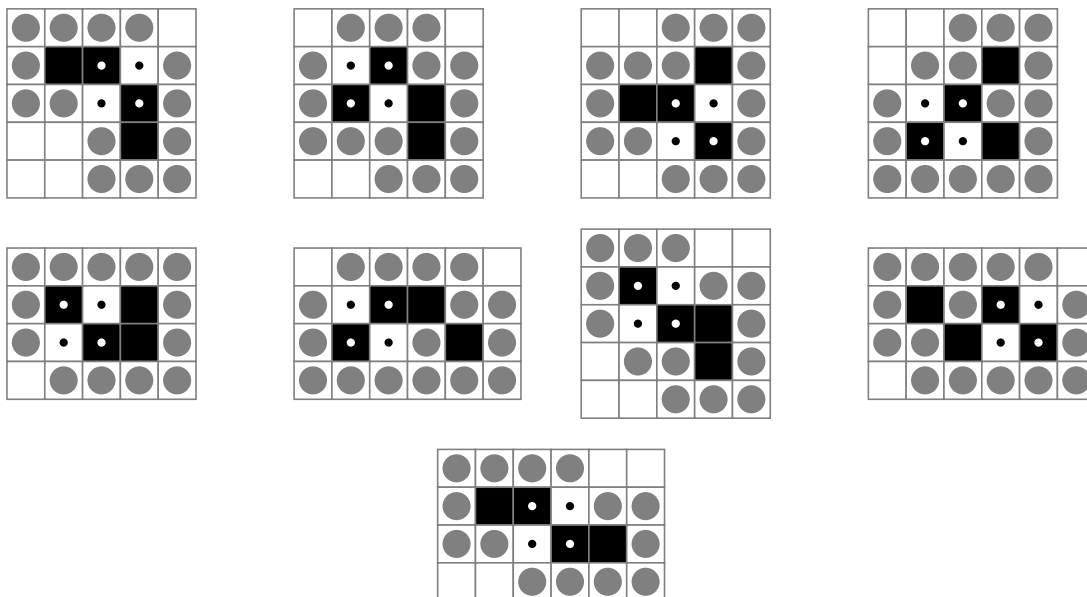
Es gibt insgesamt 3 Rominos mit Größe 3.



3.2.3 Rominos mit Größe 4

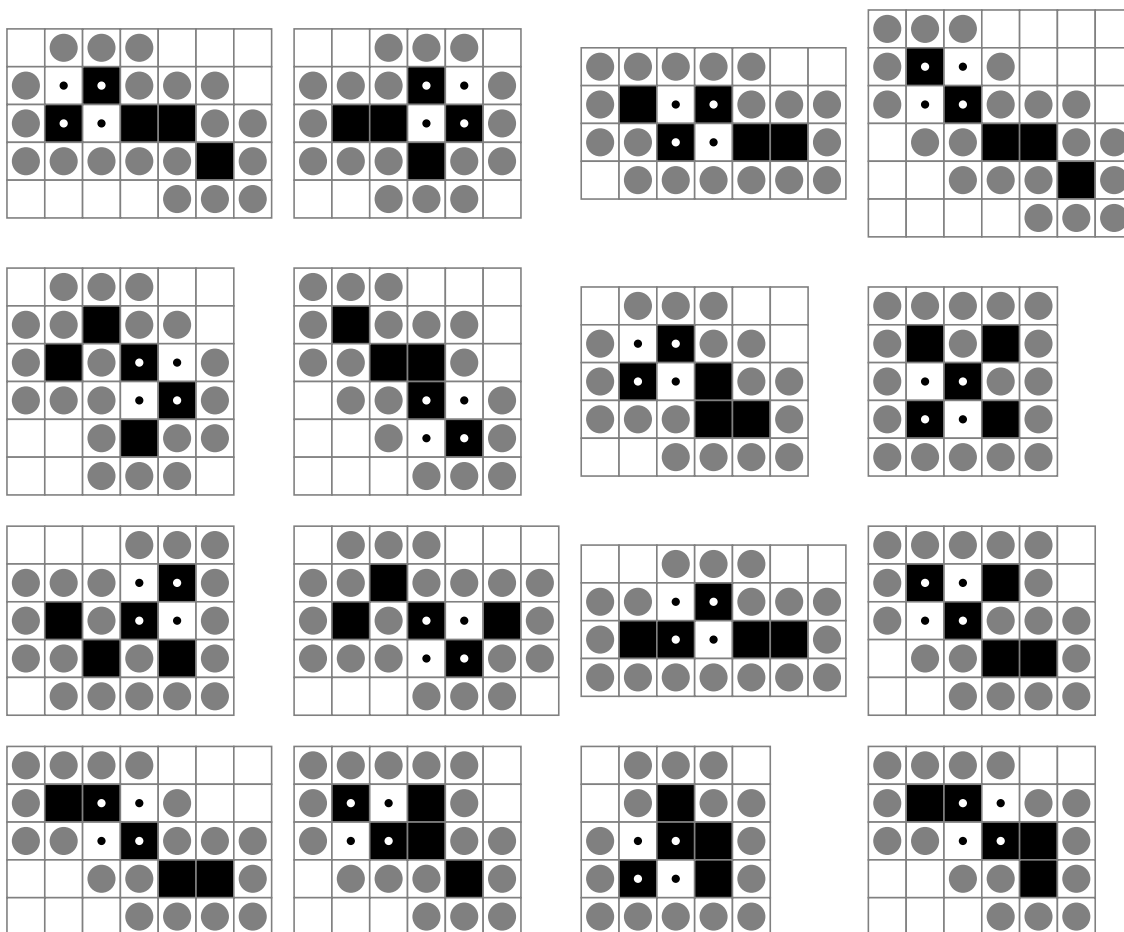
Es gibt insgesamt 17 Rominos mit Größe 4.

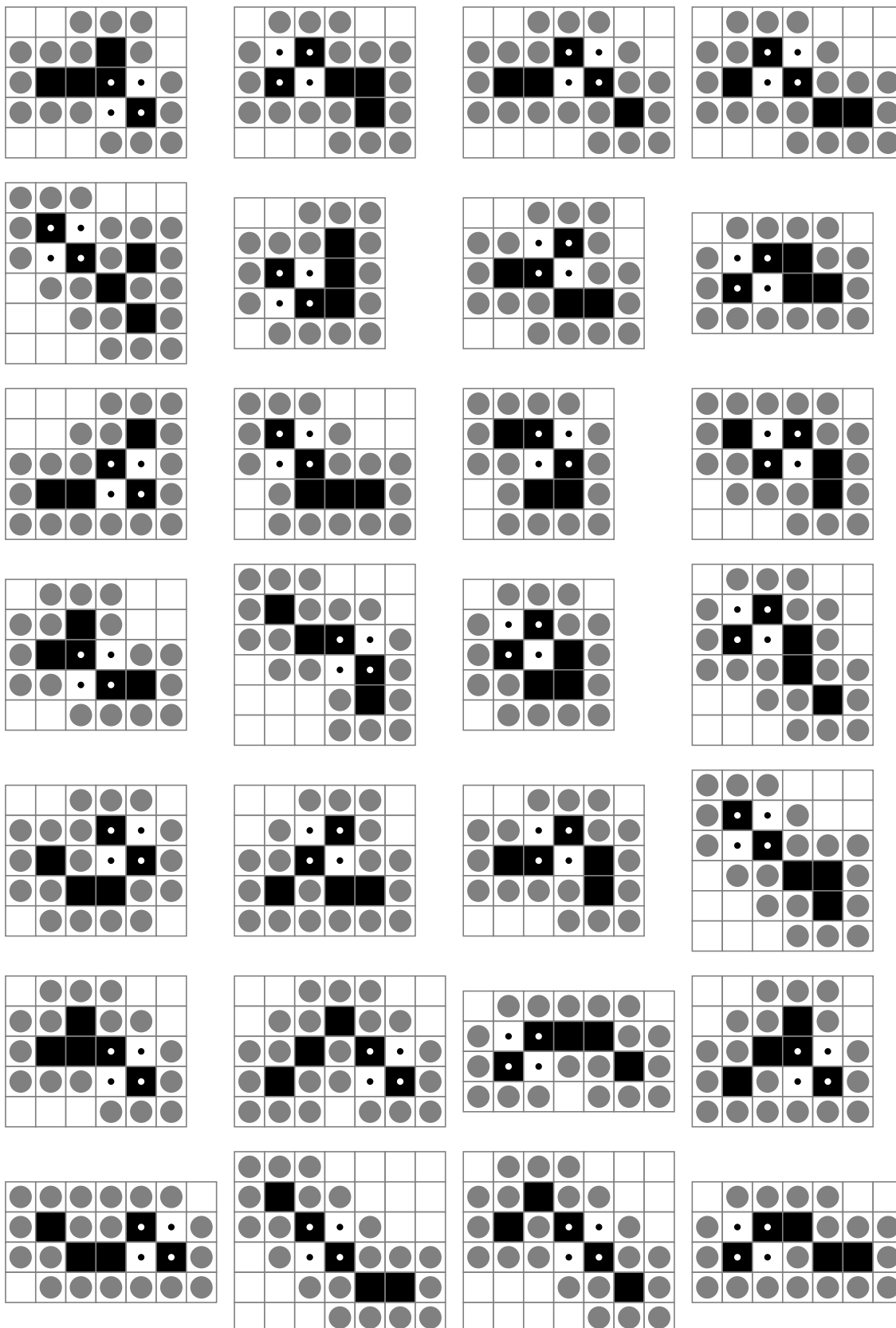


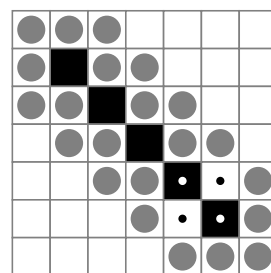
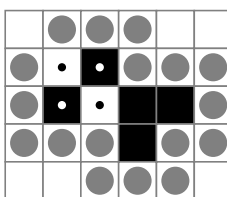
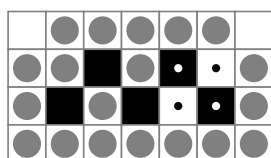
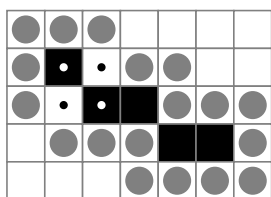
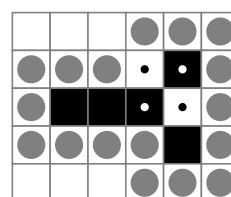
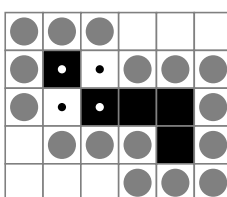
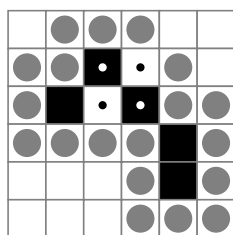
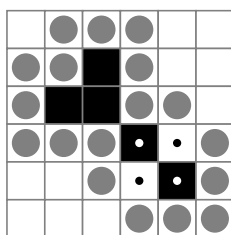
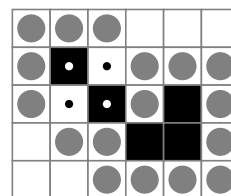
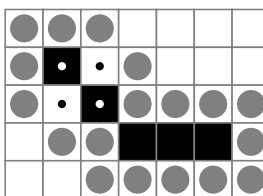
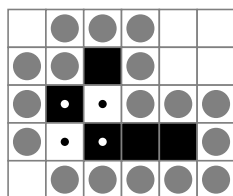
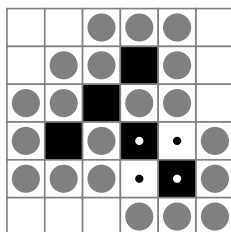
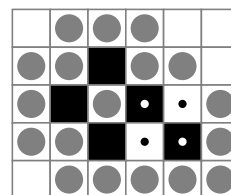
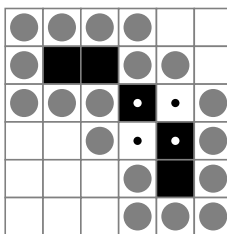
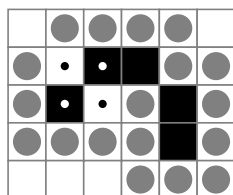
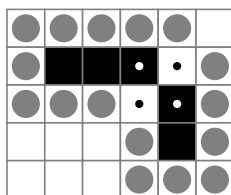
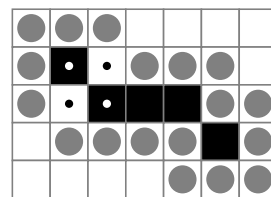
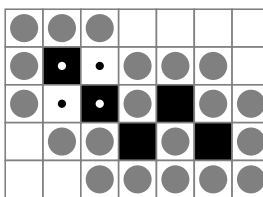
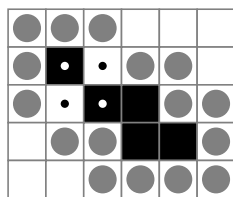
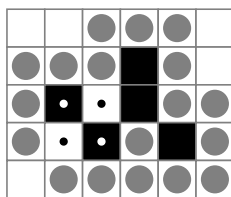
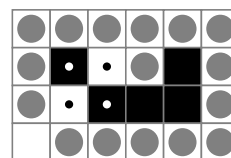
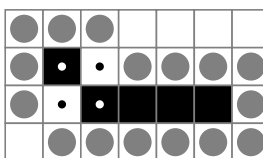
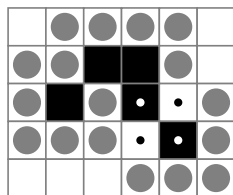
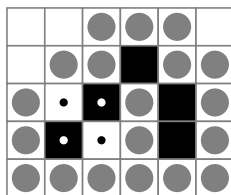
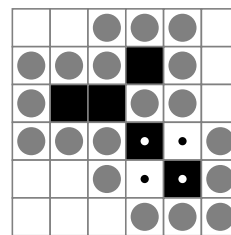
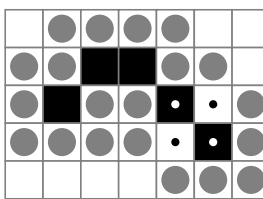
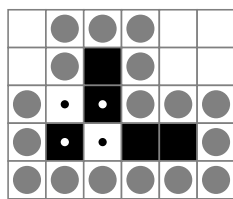
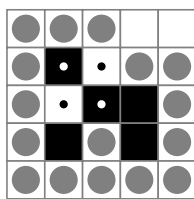


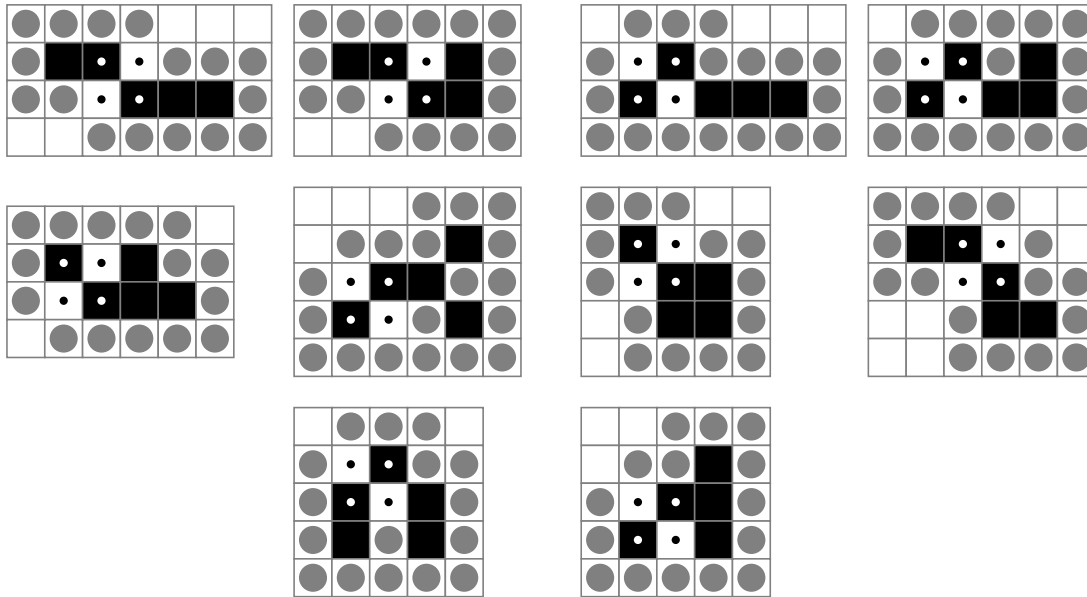
3.2.4 Rominos mit Größe 5

Es gibt insgesamt 82 Rominos mit Größe 5.









4 Quellcode

```

1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5
6 public readonly struct Romino : IEquatable<Romino>, IComparable<Romino>
7 {
8     /// <summary>
9     /// <para>
10    /// All different combinations of rotating and mirroring an arbitrary romino.
11    /// </para>
12    /// <para>
13    /// BlockMap represents the functor mapping a block coordinate from the origin romino
14    /// to the rotated/mirrored romino.
15    /// </para>
16    /// <para>
17    /// DiagonalRootMap represents the functor mapping the DiagonalRoot from the origin
18    /// romino
19    /// to the rotated/mirrored romino.
20    /// Different from BlockMap because the DiagonalRoot is always the upper left of a
21    /// square
22    /// of 4 coords;
23    /// </para>
24    /// <para> e.g. when mirroring along the y-Axis (x => (-x.X, x.Y)):
25    ///
26    /// Before After
27    /// | |
28    /// | |
29    /// </para>
30    /// </summary>
31    private static readonly (Func<Vector2Int, Vector2Int> BlockMap, Func<Vector2Int,
        Vector2Int> DiagonalRootMap)[] Maps = new (Func<Vector2Int, Vector2Int> BlockMap,
        Func<Vector2Int, Vector2Int> DiagonalRootMap)[]
    {
        (x => new Vector2Int(+x.X, +x.Y), x => new Vector2Int(+x.X, +x.Y)),
    }

```

```

32     (x => new Vector2Int(+x.X, -x.Y), x => new Vector2Int(+x.X, ~x.Y)),
33     (x => new Vector2Int(-x.X, +x.Y), x => new Vector2Int(~x.X, +x.Y)),
34     (x => new Vector2Int(-x.X, -x.Y), x => new Vector2Int(~x.X, ~x.Y)),
35     (x => new Vector2Int(+x.Y, +x.X), x => new Vector2Int(+x.Y, +x.X)),
36     (x => new Vector2Int(+x.Y, -x.X), x => new Vector2Int(+x.Y, ~x.X)),
37     (x => new Vector2Int(-x.Y, +x.X), x => new Vector2Int(~x.Y, +x.X)),
38     (x => new Vector2Int(-x.Y, -x.X), x => new Vector2Int(~x.Y, ~x.X)),
39 };
40
41 /// <summary>
42 /// The smallest Romino possible
43 /// </summary>
44 public static Romino One =
45     new Romino(blocks: new[] { new Vector2Int(0, 0), new Vector2Int(1, 1) },
46         possibleExtensions:
47             // These are hardcoded in by hand, because this list is only populated lazily
48             // by appending, rather than computed once.
49             // As this first romino can not be computed like other rominos, this won't be
50             // populated using normal methods.
51             new[] { new Vector2Int(-1, -1), new Vector2Int(0, -1), new Vector2Int(1, -1),
52                 new Vector2Int(-1, 0), new Vector2Int(2, 0),
53                 new Vector2Int(-1, 1), new Vector2Int(2, 1),
54                 new Vector2Int(0, 2), new Vector2Int(1, 2), new
55                 Vector2Int(2, 2), }
56             .ToList(),
57         diagonalRoot: new Vector2Int(0, 0),
58         max: new Vector2Int(1, 1));
59
60 /// <summary>
61 /// All the Blocks composing the Romino.
62 /// </summary>
63 public readonly Vector2Int[] Blocks;
64
65 /// <summary>
66 /// All possible positions for adding new blocks.
67 /// </summary>
68 /// <remarks>
69 /// This is a list, yet the length is fixed.
70 /// Reason for this is, that at the point of creation, the size of this is not known,
71 /// and converting to an array after the size is known adds unnecessary overhead.
72 /// </remarks>
73 public readonly List<Vector2Int> PossibleExtensions;
74
75 /// <summary>
76 /// The upper left (lowest x, y) corner of the protected diagonal.
77 /// </summary>
78 public readonly Vector2Int DiagonalRoot;
79
80 /// <summary>
81 /// The highest x and y coordinates of any block inside the romino.
82 /// </summary>
83 public readonly Vector2Int Max;
84
85 /// <summary>
86 /// The unique code assigned to this romino.
87 /// </summary>
88 private readonly BitBuffer512 _uniqueCode;

```

```

87  /// <summary>
88  /// Gets all the blocks blocked by the protected diagonal.
89  /// </summary>
90  public readonly IEnumerable<Vector2Int> DiagonalRootBlockade
91  {
92      get
93      {
94          yield return DiagonalRoot + new Vector2Int(0, 0);
95          yield return DiagonalRoot + new Vector2Int(0, 1);
96          yield return DiagonalRoot + new Vector2Int(1, 0);
97          yield return DiagonalRoot + new Vector2Int(1, 1);
98      }
99  }
100
101  /// <summary>
102  /// Initializes and orients a new instance of the <see cref="Romino"/> structure.
103  /// </summary>
104  /// <param name="blocks">All the Blocks composing the Romino.</param>
105  /// <param name="possibleExtensions">All possible positions for adding new
106  ///   blocks.</param>
107  /// <param name="diagonalRoot">The upper left (lowest x, y) corner of the protected
108  ///   diagonal.</param>
109  /// <param name="max">The highest x and y coordinates of any block inside the
110  ///   romino.</param>
111  public Romino(Vector2Int[] blocks, List<Vector2Int> possibleExtensions, Vector2Int
112  diagonalRoot, Vector2Int max)
113  {
114      Blocks = blocks;
115      DiagonalRoot = diagonalRoot;
116      PossibleExtensions = possibleExtensions;
117      Max = max;
118
119      _uniqueCode = default; // Needs to be assigned in order to call methods, including
120      CalculateUniqueCode.
121      _uniqueCode = CalculateUniqueCode();
122
123      // Find highest unique Code.
124      // Start of with asserting the current permutation to be the one with the highest
125      // unique code.
126      int maxIndex = 0;
127      BitBuffer512 maxCode = _uniqueCode;
128
129      // Check against all other permutations, skipping 1, as thats already been
130      // calculated.
131      for (int i = 1; i < Maps.Length; i++)
132      {
133          var uniqueCode = CalculateUniqueCode(Maps[i].BlockMap);
134          if (maxCode < uniqueCode)
135          {
136              maxIndex = i;
137              maxCode = uniqueCode;
138          }
139      }
140
141      // Only make changes if the highest unique Code isn't the initial state
142      // (Maps[0] = (x => x, x => x))
143      if (maxIndex != 0)
144      {

```

```

138         (Func<Vector2Int, Vector2Int> blockMap, Func<Vector2Int, Vector2Int>
            diagonalRootMap) = Maps[maxIndex];
139
140         var offset = CalculateOffset(blockMap);
141
142         for (int i = 0; i < Blocks.Length; i++) Blocks[i] = blockMap(Blocks[i]) +
            offset;
143         for (int i = 0; i < PossibleExtensions.Count; i++) PossibleExtensions[i] =
            blockMap(PossibleExtensions[i]) + offset;
144
145         DiagonalRoot = diagonalRootMap(DiagonalRoot) + offset;
146
147         // Don't add offset to max, it might end up with x or y equal to 0.
148         var mappedMax = blockMap(Max);
149         // Take the absolute of both components, we only care about swapping of x and
            y, not inversion.
150         Max = new Vector2Int(Math.Abs(mappedMax.X), Math.Abs(mappedMax.Y));
151
152         // Recalculate the unique code, as the currently saved one is for Maps[0].
153         _uniqueCode = CalculateUniqueCode();
154     }
155 }
156
157 public static IEnumerable<(int Size, List<Romino> Rominos)> GetRominosUntilSize(int
    size)
158 {
159     // Validate arguments outside of iterator block, to prevent the exception being
        thrown lazily.
160     if (size < 2) throw new ArgumentOutOfRangeException(nameof(size));
161
162     return GetRominosUntilSizeInternal();
163
164     IEnumerable<(int Size, List<Romino> Rominos)> GetRominosUntilSizeInternal()
165     {
166         // Start out with the smallest romino
167         List<Romino> lastRominos = new List<Romino> { One };
168
169         // The size of the smallest Romino is 2 blocks; yield it as such.
170         yield return (2, lastRominos);
171
172         for (int i = 3; i <= size; i++)
173         {
174             var newRominos = lastRominos
175                 // Enable parallelization using PLINQ.
176                 .AsParallel()
177                 // Map every romino to all rominos generated by adding one block to it.
178                 .SelectMany(x => x.AddOneNotUnique())
179                 // Remove duplicates, rominos are already oriented here.
180                 .Distinct()
181                 // Execute Query by iterating into a list. Cheaper than .ToArray()
182                 .ToList();
183
184             // We don't need last generations rominos anymore. Replace them with the
                new generation.
185             lastRominos = newRominos;
186             // Yield this generations rominos with their size.
187             yield return (i, newRominos);
188         }

```

```

189     }
190 }
191
192 // Generate IEnumerable<T> instead of allocating a new array
193 /// <summary>
194 /// Gets all direct neighbours of a given block, not including the block itself.
195 /// </summary>
196 /// <param name="block">The block to get the neighbours of</param>
197 /// <returns>An <see cref="IEnumerable{Vector2Int}"> yielding all neighbours</returns>
198 private static IEnumerable<Vector2Int> GetDirectNeighbours(Vector2Int block)
199 {
200     yield return block + new Vector2Int(0, -1);
201     yield return block + new Vector2Int(0, 1);
202     yield return block + new Vector2Int(1, 0);
203     yield return block + new Vector2Int(1, -1);
204     yield return block + new Vector2Int(1, 1);
205     yield return block + new Vector2Int(-1, 0);
206     yield return block + new Vector2Int(-1, -1);
207     yield return block + new Vector2Int(-1, 1);
208 }
209
210 /// <summary>
211 /// Returns all rominos generated by adding one block from <see
212     cref="PossibleExtensions">
213 /// </summary>
214 /// <remarks>Does not remove duplicates, but orients results.</remarks>
215 /// <returns>All, non-unique rominos generated by adding one block from <see
216     cref="PossibleExtensions">.</returns>
217 public readonly IEnumerable<Romino> AddOneNotUnique()
218 {
219     foreach (var newBlock in PossibleExtensions)
220     {
221         // If the new block has x or y smaller than 0, move the entire romino such that
222         // the lowest x and y are 0.
223         // This offset will need to be applied to anything inside the romino.
224         var offset = new Vector2Int(Math.Max(-newBlock.X, 0), Math.Max(-newBlock.Y, 0));
225
226         // If the new block is outside of the old rominos bounds, i.e. has bigger x or
227         // y coords than Max,
228         // increase size.
229         var newSize = new Vector2Int(Math.Max(newBlock.X, Max.X), Math.Max(newBlock.Y,
230             Max.Y));
231         // or if the new block has coordinates x or y smaller than 0, increase size.
232         + offset;
233
234         HashSet<Vector2Int> newPossibleExtensions =
235             // Get the direct neighbours, i.e. the blocks that will be possible spots
236             // for adding blocks after newBlock has been added
237             new HashSet<Vector2Int>(GetDirectNeighbours(newBlock + offset));
238
239         // Remove already occupied positions
240         newPossibleExtensions.ExceptWith(Blocks.Select(x => x + offset));
241         // Exclude positions blocked by the protected diagonal
242         newPossibleExtensions.ExceptWith(DiagonalRootBlockade.Select(x => x + offset));

```

```

243     // Remove the newly added block.
244     newPossibleExtensions.Remove(newBlock + offset);
245
246     // Allocate a new array for the new romino, with one more space then right now
247     // to store the new block in.
248     Vector2Int[] newBlocks = new Vector2Int[Blocks.Length + 1];
249
250     for (int i = 0; i < Blocks.Length; i++)
251     {
252         // Copy elements from current romino and apply offset.
253         newBlocks[i] = Blocks[i] + offset;
254     }
255
256     // Insert the new block, also, with offset.
257     newBlocks[Blocks.Length] = newBlock + offset;
258
259     yield return new Romino(
260         newBlocks,
261         new List<Vector2Int>(newPossibleExtensions),
262         // Apply offset to the diagonal root as well.
263         DiagonalRoot + offset,
264         newSize);
265 }
266 }
267
268 private readonly BitBuffer512 CalculateUniqueCode()
269 { /* CalculateUniqueCode(x => x) with the parameter inlined */ }
270
271 private readonly BitBuffer512 CalculateUniqueCode(Func<Vector2Int, Vector2Int> func)
272 {
273     var bits = new BitBuffer512();
274
275     // "Definitely very useful caching"
276     int length = Blocks.Length;
277
278     // Calculate the offset to be applied.
279     var offset = CalculateOffset(func);
280
281     for (int i = 0; i < Blocks.Length; i++)
282     {
283         // Map the block and apply the offset.
284         var mapped = func(Blocks[i]) + offset;
285
286         // Assign the relevant bit ( $2^{((y * \text{len}) + x)} = 1 \ll ((y * \text{len}) + x)$ )
287         bits[(mapped.Y * length) + mapped.X] = true;
288     }
289
290     return bits;
291 }
292
293 /// <summary>
294 /// Calculates the offset by which blocks inside the romino need to be moved after
295 /// applying a given function
296 /// in order to still have the lowest x and y be equal to 0.
297 /// </summary>
298 /// <remarks>The function <paramref name="map"/> may not apply any translations, only
299 /// scaling and rotation around the origin (0, 0) is handled.</remarks>
300 /// <param name="map">The function to calculate the offset for.</param>

```



```
300    /// <returns>The offset that needs to be applied to set the minimum x and y
      coordinates after applying <paramref name="map"/> back to 0.</returns>
301    private readonly Vector2Int CalculateOffset(Func<Vector2Int, Vector2Int> map)
302    {
303        var mappedSize = map(Max);
304        // We only need to offset if the blocks are being moved into the negative,
305        // as translations from map are forbidden, and such the min will only change by
306        // mirroring around an axis or rotating.
307        return new Vector2Int(Math.Max(-mappedSize.X, 0), Math.Max(-mappedSize.Y, 0));
308    }
309
310    /// <remarks>Returns invalid results for comparisons between rominos of different
      sizes</remarks>
311    public override readonly bool Equals(object obj) => obj is Romino romino &&
      Equals(romino);
312
313    public override readonly int GetHashCode() => _uniqueCode.GetHashCode();
314
315    /// <remarks>Returns invalid results for comparisons between rominos of different
      sizes</remarks>
316    public readonly bool Equals(Romino romino) => _uniqueCode == romino._uniqueCode;
317
318    /// <remarks>Returns invalid results for comparisons between rominos of different
      sizes</remarks>
319    public readonly int CompareTo(Romino other) =>
      _uniqueCode.CompareTo(other._uniqueCode);
320 }
```