

Seminarieuppsatser nr 147

# Metod för vindkraftslokalisering med hjälp av GIS och oskarp logik

**Edvin Eriksson & Kristoffer Mattisson**

---

2008  
Centrum för Geobiosfärvetenskap  
Naturgeografi och Ekosystemanalys  
Lunds Universitet  
Sölvegatan 12  
223 62 Lund





# Metod för vindkraftslokalisering med hjälp av GIS och oskarp logik

---

**Edvin Eriksson & Kristoffer Mattisson**

Examensarbete för filosofikandidat i Naturgeografi Lunds universitet 2008

Handledare:

Harry Lankreijer, Docent  
Peter Alstorp, Konsult SWECO Position  
Albin Lundmark, Konsult SWECO Position

Institutionen för Naturgeografi och ekosystemsanalys  
Lunds universitet, 2008, Nr 147



## Förord

Uppsatsen är ett examensarbete på 15hp som skrivits i samarbete med konsultföretaget SWECO Position i Malmö, för Naturgeografiska Institutionen på Lunds universitet. Examensarbetet är en del i kursen NGEK01. Idén till uppsatsen kommer ursprungligen från SWECO Position som tidigare tagit fram lämpliga lokaliseringar av vindkraftverk med enklare metoder. Uppsatsen beskriver hur lämpliga lokaliseringar av vindkraftverk skulle kunna tas fram med hjälp av oskarp logik. Vi har blivit välmottagna på SWECO och vill framförallt framföra ett tack till våra två handledare på SWECO Albin Lundmark och Peter Alstorp som varit till stor hjälp. Ett extra tack bör också riktas till Johan Sigfrid och Pavel Sensky och övriga på SWECO Position i Malmö. För synpunkter om arbetet, både gällande innehåll och språk, vill vi även tacka Olof af Wåhlberg och Veronika Raguž samt vår handledare på Lunds universitet Harry Lankreijer.



## **Abstract**

Wind-power is the fastest growing energy source in the world today. In 2002 the Swedish Parliament established a goal for an annual energy production of 10TWh from wind-power in 2015. This is an increase of 9.1TWh from the current production of 0,9TWh. In order to achieve this objective a well-functioning decision-making process is needed for the siting and construction of new wind power plants. Today the decision-making process takes a long time, partly because it is difficult to locate suitable sites for construction of wind power plants. Geographical information systems (GIS) and Boolean logic are tools commonly used in the process of locating suitable sites. This essay describes a different method to locate suitable areas with the help of GIS using not Boolean but Fuzzy logic. Unlike Boolean logic, Fuzzy logic gives a nuanced and more complex picture of suitability. The proposed method was evaluated against models applying Boolean logic. The evaluation study was conducted in the municipality of Tomelilla in Sweden.

**Keywords: Geography, Physical Geography, Fuzzy logic, Wind-power localisation, Membership-function, Weighted linear combination**





## Sammanfattning

Vindkraft är en förnyelsebar energikälla som ligger i tiden och är den energikälla som idag växer snabbast i världen. Eftersom Sverige har stor utbredning och långa kustpartier finns det goda möjligheter att utnyttja vind som energikälla. Sveriges riksdag har därför satt ett mål att ungefär tiodubbla energiutvinningen från vindkraft till år 2015. Den generella uppfattningen om vindkraft i Sverige är positiv, så länge man inte själv bor i närheten av ett vindkraftverk.

Tillståndsprövningen för anläggandet av nya vindkraftverk tar i dagsläget lång tid. Ett problem i tillståndsprövningen är att hitta en metod för att ta fram lämpliga områden för placering av vindkraftverk. En väl fungerande metod för detta hade kunnat påskynda ansökningsprocessen och fler vindkraftverk hade kunnat byggas fortare. Genom att använda sig av det relativt obeprövade konceptet oskarp logik, skulle en metod kunna tas fram som påskyndar dagens ansökningsprocess. Den vanligaste metoden idag är att använda sig av boolesk logik. Resultatet av boolesk logik ger en svartvit återgivning av vilka områden som är lämpliga för vindkraftverk, antingen är de lämpliga eller så är de inte det. Oskarp logik däremot ger en nyanserad bild av hur lämpligt ett område är, i form av en procentangivelse mellan 0 och 100.

Det första som måste göras för att lokalisera lämpliga plaster för nya vindkraftverk är att bestämma vilka faktorer som är viktiga. Faktorerna kan i olika grad påverka lämpligheten för anläggandet av vindkraftverk. Exempel på viktiga faktorer vid vindkraftslokalisering är vindhastigheten, avstånd till vägar, avstånd till kraftnät och avstånd till bebyggelse. Inom oskarp logik studeras faktorerna var och en för sig, för att se hur mycket de påverkar den slutliga lämpligheten i förhållande till varandra.

Uppsatsen beskriver en metod för lokalisering av lämpliga platser för vindkraftverk. Metoden baseras på oskarp logik och är framtagen i ett geografiskt informationssystem (GIS). GIS är datorprogram som används för att utföra geografiska analyser såsom vindkraftlokalisering. Den framtagna metoden tillämpades på Tomelilla kommun. De framtagna områdena lämpliga för vindkraftverk utvärderades mot booleska lämplighetskartor framtagna av Länsstyrelsen i Skåne och Energimyndigheten. Länsstyrelsen har baserat sin metod på ca 25 faktorer. Energimyndighetens lämplighetskarta visar områden av riksintressen och är baserad ett fåtal faktorer.

Utifrån resultaten kunde man tydligt se att metoden som använder oskarp logik ger en mer nyanserad bild av lämpliga områden för utbyggnad, än Länsstyrelsens och Energimyndighetens booleska områden. Nackdelen med oskarp logik är att det är en mer komplex och tidskrävande metod än boolesk logik. Fördelen är att oskarp logik kan ge en bättre återgivning av verkligheten genom att ange lämpligheten på en kontinuerlig skala.



# Innehållsförteckning

<b>FÖRORD</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>VII</b>
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TEORI</b> .....	<b>2</b>
2.1 BESLUTSTEORI .....	2
2.1.1 Tillämpning av beslutsteori inom GIS .....	2
2.2 MEDLEMSFUNKTIONER .....	3
2.2.1 Booleska medlemsfunktioner .....	4
2.2.2 Oskarpa medlemsfunktioner .....	5
2.3 KOMBINATION AV FAKTORER VID FLERFAKTORSUTVÄRDERING .....	8
2.3.1 Boolesk AND och OR .....	8
2.3.2 Oskarp AND och OR .....	9
2.3.3 Oskarp produkt och algebraisk summa .....	9
2.3.4 Viktad linjär kombination .....	10
2.3.5 Ordnat viktat medel .....	12
<b>3. METODUTVECKLING</b> .....	<b>13</b>
3.1 FAKTORER .....	13
3.1.1 Oskarpa faktorer .....	14
3.1.2 Booleska faktorer .....	14
3.2 MEDLEMSFUNKTIONER FÖR DE OSKARPA FAKTORERNA .....	15
3.2.1 Vindhastighet .....	15
3.2.2 Avstånd till regionnät .....	15
3.2.3 Avstånd till vägar .....	16
3.2.4 Avstånd till bebyggelse .....	17
3.3 METOD FÖR VIKTNING .....	17
3.4 ANALYS AV STUDIEOMRÅDET TOMELILLA .....	18
3.4.1 Data .....	19
3.5.2 Uppbyggnad av modellen .....	20
<b>4. RESULTAT</b> .....	<b>21</b>
<b>5. DISKUSSION</b> .....	<b>28</b>
<b>6. SLUTSATSER</b> .....	<b>34</b>
<b>7. REFERENSER</b> .....	<b>35</b>
<b>BILAGA 1. SKRIPT SOM ANVÄNDES I ANALYSEN</b> .....	<b>38</b>
<b>BILAGA 2. FLÖDESSCHEMA ÖVER MODELLEN I ARCMAP MODELBUILDER 9.2</b> .....	<b>39</b>



# 1. Inledning

Vindkraften är idag den energiform som växer snabbast i världen (Wizelius 2003). I Europa utgör vindkraften ungefär 3 procent av den totala elförbrukningen, i Sverige endast 0,7 procent (Vindkraft - Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007). För att öka andelen vindproducerad el fastställde Sveriges riksdag våren 2002 ett planeringsmål för vindkraft. Målet var att uppnå en årlig produktion på 10TWh år 2015, detta innebär en ökning på 9,1TWh från nuvarande 0,9TWh (Verksamheter med miljöpåverkan 2008). År 2007 tog Boverket fram ett nytt förslag på planeringsmål där målsättningen ytterligare höjdes. I rapporten föreslås att Sverige 2020 skall producera 30TWh el per år från vindkraft, 20TWh på land och 10TWh till havs (Tennberg och Bjursell 2007). Detta innebär en ökning i antal vindkraftverk från nuvarande 900 till ca 3000-6000. För att klara de ställda målen kommer en stor och snabb tillväxt att krävas. Sverige som land tros ha kapacitet för att klara en sådan tillväxt, tack vare sin stora utbredning och sina långa kuster (Vindkraft - Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007).

Trots högt satta mål har nybyggnationen av vindkraftverk i Sverige ännu inte skjutit fart. Allmänhetens syn på vindkraftverk i Sverige är generellt positiv, men problem uppstår ofta då vindkraftverk ska anläggas p.g.a. lokala konflikter med markägare och kommuner (Söderholm et al 2007). En annan starkt bidragande orsak till att det går långsamt är att ansökningsprocessen tar lång tid (Uusmann 2007). Det är många faktorer och intressen som måste beaktas. Faktorer är företeelser som anses vara viktiga för att målet skall kunna uppfyllas. Exempel på faktorer viktiga vid vindkraftlokalisering kan vara avstånd till vägar, elnät och byggnader. För att påskynda ansökningsprocessen krävs metoder för att effektivt kunna avgöra om ett område är lämpligt för utbyggnad. En enkel metod som ofta används är en så kallad boolesk överlagring. I en sådan överlagring är faktorernas gränser skarpa. För varje faktor bestäms vilka kriterier som är godkända och vilka som inte är det. Överlagring sker mellan alla faktorerna och endast de områden där samtliga faktorer uppfyller kriterierna anses godkända. Problemet med metoden är att det kan finnas kontinuerliga övergångar från godkänt till inte godkänt. Det kan t.ex. vara tillåtet att bygga 200m från ett hus, men bättre att bygga 800m ifrån det. Med hjälp av oskarp logik kan man ta hänsyn till detta. Genom att använda sig av medlemsfunktioner kan graden av medlemskap anges kontinuerligt mellan två gränsvärden, i detta fall mellan 200 och 800m. Graden av medlemskap beskriver hur pass väl varje faktor, var för sig, uppfyller kriterierna på en skala mellan 0 och 1. Samtliga faktorer med kontinuerliga övergångar, d.v.s. oskarpa faktorer, tilldelas varsin medlemsfunktion. Faktorerna kan sedan viktas mot varandra innan de överlagras. Resultatet blir en lämplighetsgrad som anges mellan 0 och 100 procent. Oskarp logik ger en mer nyanserad bild av verkligheten än de booleska överlagringarna. För att kunna undersöka möjligheten till vindkraftslokalisering över större områden, t.ex. en kommun, görs först en översiktlig utvärdering över vilka områden som skulle kunna vara möjliga överhuvudtaget. Därefter en mer detaljerad undersökning då hänsyn tas till lokala faktorer som turbulens, kommunala intressen, kulturintressen o.s.v.. En metod som bättre beskriver vilka områden som är lämpliga för vindkraftsetablering hade kunnat stödja beslutsfattningsförfarandet.

Syftet med undersökningen är att ta fram en metod som lämpar sig för att lokalisera vindkraftverk, med hjälp av oskarp logik, i ett översiktligt planeringsskede. Metoden skall sedan tillämpas i en analys på ett område av kommunstorlek och en diskussion kommer att föras kring resultatet. För att kunna tillämpa metoden i ett geografiskt informationssystem (GIS) ska en modell byggas upp i programmet ArcGis.

För att kunna ta fram en sådan metod ska först de faktorer som är viktiga för vindkraftslokalisering väljas ut. Andra steget är att bestämma vilka av dessa faktorer som skall tilldelas oskarpa respektive booleska gränser. De oskarpa faktorerna behöver sedan tilldelas varsin medlemsfunktion. Faktorerna ska kombineras i en flerfaktorsanalys, där metoden för sammanslagningen ska väljas ut. Vidare finns det olika sätt att bestämma den inbördes viktningen mellan faktorerna i sammanslagningen. Olika viktningssätt kommer att tillämpas för att testa deras påverkan på slutresultatet. När metoden är bestämd ska modellen testas och resultatet utvärderas mot riksintressen på land (riksintresse vindkraft 2008). Utvärdering ska även ske mot Länsstyrelsen i Skånes (Lepic och Fagerström 2006) booleska analys över lämpliga områden för vindkraft. Resultatet av utvärderingen ska ge en uppfattning om skillnaden mellan oskarp- och boolesk logik inom vindkraftslokalisering samt hur pass väl de framtagna områdena skiljer sig åt. Målgruppen för examensarbetet är naturvetenskapsstudier med vissa förkunskaper.

## **2. Teori**

### **2.1 Beslutsteori**

Att fatta beslut om hur resurser skall allokeras och var i geografien olika typer av antropogena strukturer och byggnationer skall placeras är en av de vanligaste aktiviteterna inom landskapsplanering (FAO 1976 i Eastman et al. 1995). Med införandet av geografiska informationssystem (GIS) som standardverktyg har analyserna av sådana beslut förenklats avsevärt, dock blir resultatet från ett GIS aldrig mer noggrant än de beslut som analysen är uppbyggd kring. Därmed är det viktigt att de beslut som ligger till grund är utförda enligt fackmässiga former, både i valet av de rumsliga företeelser som ska analyseras samt vilken metodik som ska nyttjas. (Eastman et al. 1995)

Ett beslut inom beslutsteori är ett val mellan olika alternativ, t.ex. val av olika klassificeringar, val av olika hypoteser o.s.v. De olika alternativ för vilka beslutet som skall tas och vad de ska innehålla, kallas för beslutsram. Personerna för vilken beslutsramen är skapad för och således är involverade i beslutet kallas kandidatgrupp, vilka ska besitta en fackmässig kunskap rörande området (Eastman 2006). Det är viktigt att beslutsramen är enkel i sin uppbyggnad och att den går att förstå intuitivt (Saaty 1990). Saaty identifierar en beslutsprocess som bör följas vid beslutshandling. Beslutet ska utgå från ett ställt mål, där olika element identifieras som symboliserar den problematisering som finns för beslutet. Därefter skapas en modell som beskriver den inbördes relationen mellan elementen, samt hur de ingående elementen ska prioriteras mot varandra för att bäst uppnå målet.

#### **2.1.1 Tillämpning av beslutsteori inom GIS**

För att ett beslut ska kunna tas inom GIS behövs faktorer, vilka är de rumsliga entiteter som analysen är uppbyggd kring t.ex. vägar, infrastruktur, vattendrag o.s.v. Faktorerna kan delas in i oskarpa faktorer och begränsningar. Begränsningar avser att reducera antalet möjligheter för lämpliga lokaliseringar av en önskad företeelse. Detta kan göras med booleska gränser som delar in lämplighet i två klasser, ofta 1 och 0 (Eastman et al. 1995). T.ex. kan naturreservat vara direktbegränsande för anläggning av motorvägar. Begränsningar kan även utgöras av egenskaper som slutprodukten måste erhålla för att syftet ska vara uppfyllt, t.ex. det kan finnas ett krav på att lämpliga områden för byggnation av motorvägar måste vara 30m breda. Sådana begränsningar kallas för mål (Ignizio i Eastman et al. 1995). Oskarpa faktorer är å andra sidan rumsliga attribut som bidrar till att öka eller minska lämpligheten för klassning och lokalisering av tänkta företeelser, genom en kontinuerlig förändring av attributen i rummet (Eastman 2006). Ett exempel är markfuktens påverkan på hur lämpligt det är att odla

bananträd. Markfukten är inte direktbegränsande, däremot ökar avkastningen med ökad markfukt enligt ett linjärt samband (Schubert 2004).

De olika faktorerna väljs ut och kombineras efter något som kallas beslutsregler, t.ex. är avstånd till sevärdheter och transportcentraler av intresse då hotell ska lokaliseras (Tsong-Yu Chou et al 2007). Beslutsreglerna kan t.ex. säga att längre än 1km från sevärdheter och transportcentraler är det direkt olämpligt för en nybyggnation av ett hotell. Beslutsreglerna styrs i sin tur av uppdragets inriktning ifråga, inom t.ex. jordbruksplanering kan resultatet av en analys te sig annorlunda om ett ekologiskt jordbruk planeras kontra ett jordbruk som strävar efter maximal produktion (Eastman 2006).

Inom landskapsplanering finns det ofta flera olika intressen för hur man skall utnyttja resurserna och marken. Ibland verkar dessa intressen som komplement gentemot varandra, dock finns det flera tillfällen då det uppstår konflikter hur marken skall användas. Miljö och ekonomi är två intressenter som brukar ligga i konflikt med varandra t.ex. om ett landområde skall bli naturskyddsområde eller projekteras till bostadsområde.(Eastman 2006)

Faktorerna i ett beslutssystem inom GIS, antingen booleska eller oskarpa, standardiseras med s.k. medlemsfunktioner där numeriska värden tilldelas mellan 0 och 1. Därefter kombineras de med lämpliga matematiska operationer t.ex. AND, OR eller i fallet med oskarpa faktorer, oskarp algebraisk summa, viktad linjär kombination o.s.v. Resultatet från sammanslagningen kan sedan klassificeras från numeriska värden till en passande måttstock ofta i form av deskriptiva klasser.(McBratney & Odeh 1997)

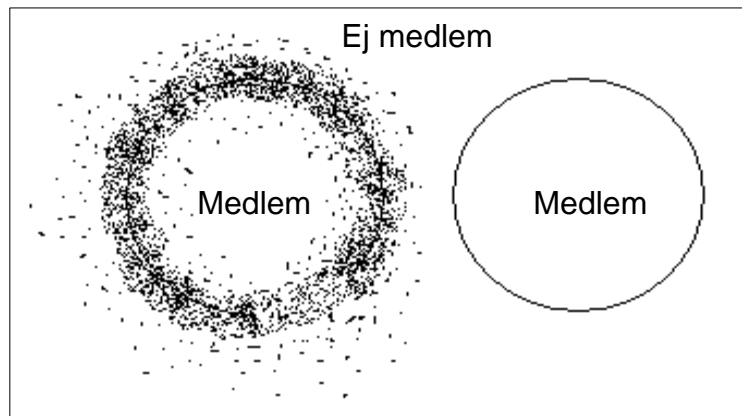
Det finns två typer av källor för osäkerheter som uppstår i samband med beslutsprocessen för flerfaktorsutvärdering. Den första är den som uppstår p.g.a. osäkerhet i mätdata. Denna typ av fel kallas dataosäkerhet. Den andra typen av källa för osäkerhet kallas beslutsunderlagsosäkerhet. Anledningen till att beslutsunderlagsosäkerheten uppstår är fel val av faktorer och deras medlemsfunktioner samt hur dessa faktorer kombineras.(Eastman 2006)

## **2.2 Medlemsfunktioner**

Olika företeelser mäts ofta i olika enheter t.ex. en sträcka mäts i meter och temperatur mäts i °C. Produkten utav en kombination av faktorer med olika enheter blir svårtolkad då resultatet är svårt att kvantifiera. Det är dessutom vanligt att kombinera olika faktorer med hänseende på lämpliga attribut hos faktorerna. För att komma runt problemet kan faktorerna standardiseras med enhetslösa numeriska värden, som uttrycker en lämplighet för det avsedda syftet, och därmed anger ett medlemskap hos faktorn i definierade klasser.(Burrough 1989)

Medlemskap kan uttryckas på flera sätt och definieras olika inom boolesk logik och i oskarp logik, det senare behandlas utförligare i arbetet. Skillnaden mellan de båda illustreras i figur 1, inuti cirklarna tilldelas ett definitivt medlemskap. Den vänstra cirkeln har en mer diffus övergång för vad som tillhör cirkelklassen, vilket symboliserar oskarp logik (Burrough & McDonnell 1998). För att beskriva olika grader av medlemskap hos faktorer så kan analytiska uppställningar göras. Antagande kan göras att  $x$  är en variabel i talmängden  $X$ , se formel 1. Utifrån variabeln  $x$  kan sedan en uppställning  $A$  ställas upp, där en medlemsfunktion  $\mu_A(x)$  skapas utifrån satta begränsningar på variabeln  $x$ , se formel 2 (Zadeh 1965). Man kan betrakta  $\mu_A(x)$  som graden av tillhörighet av variabeln  $x$  i uppställningen  $A$ , där ett högt värde ger en högre tillhörighet. T.ex. om variabeln skog ( $x$ ) består av 70 % granskog så betyder det att skogen klassas som 70 % medlem ( $\mu_A(x)$ ) i uppställningen granskog ( $A$ ).

Medlemsfunktionerna kan antingen vara diskontinuerliga eller kontinuerliga beroende på om det är boolesk logik eller oskarp logik som används.(Burrough 1989)



Figur 1. Konceptuell bild som visar graden av medlemskap, där cirkeln motsvarar fullständigt medlemskap. I den vänstra cirkeln är det en mer diffus övergång än den högra, den högra cirkeln symboliserar boolesk logik och den vänstra oskarp logik. (Skapad av Eriksson utifrån Burrough & McDonnell (1998))

$$X = \{x\} \quad (\text{Formel 1})$$

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X \quad (\text{Formel 2})$$

- X = Talmängd
- x = variabel
- A = Medlemsuppställning
- $\mu_A(x)$  = Medlemsfunktion beroende av x

Formel 1 och 2. Formel 1 visar en analytisk definition av talmängden X som består av alla möjliga tal x. Formel 2 illustrerar en medlemsuppställning A som består av en medlemsfunktion  $\mu_A(x)$  vilken är beroende av en variabel x som i sin tur ingår i talmängden X.

## 2.2.1 Booleska medlemsfunktioner

Om den sökta medlemsfunktionen  $\mu_A(x)$  endast antar två värden, vilket är sant då den högra cirkeln i figur 1 analyseras, kan en boolesk medlemsfunktion beskrivas enligt följande. Värden på x större eller lika med gräns b tilldelas värdet 1 och värden på x mindre än gräns b tilldelas värdet 0, se formel 3.(Burrough 1989) Funktionen är en binär motsvarighet till den klassiska logikens sant eller falskt (McBratney & Odeh 1997). Den booleska uppställningen kan även förlängas till att ha fyra gränser istället för två. Det kan t.ex. vara olämpligt att bygga mindre än 200m från en väg, men även olämpligt att bygga längre än 400m från vägen. I ett sådant fall tilldelas värdet 1 för värden på x större eller lika med b men mindre än c, se formel 4. En schematisk bild av en boolesk medlemsuppställning ses i figur 2, som illustrerar den skarpa övergången från 0 till 1.(Burrough 1998)

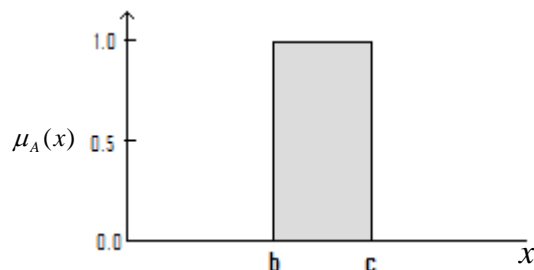


$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 0, x < b \\ \mu_A(x) &= 1, x \geq b \end{aligned} \quad x \in X \quad (\text{Formel 3})$$

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 0, x < b \\ \mu_A(x) &= 1, b \leq x \leq c \\ \mu_A(x) &= 0, x > c \end{aligned} \quad x \in X \quad (\text{Formel 4})$$

- $\mu_A(x)$  = Medlemsfunktion av variabeln x
- x = Variabel
- X = Talmängd
- b, c = Satta gränser då medlemsfunktionen ändrar värde

Formel 3 och 4. Formel 3 visar en ensidig booleskmedlemsfunktion. Formel 4 visar en tvåsidig boolesk medlemsfunktion. Övergången mellan 0 och 1 och vice versa sker genom de booleska gränserna b och c.



Figur 2. Schematisk bild som illustrerar en boolesk medlemsuppställning. Övergången mellan 0 och 1 och vice versa sker vi de booleska gränserna b och c. Bilden illustrerar formel 4 för tvåsidig boolesk medlemsfunktion. (Skapad av Eriksson utifrån Burrough & McDonnel (1998))

## 2.2.2 Oskarpa medlemsfunktioner

Egenskaper hos många rumsliga faktorer förändras kontinuerligt i rummet. Tillhörighet i olika medlemsklasser hos sådana faktorer kan därmed inte beskrivas särskilt bra med abrupta medlemsgränser. Exempel på sådana faktorer är närhet till objekt, jordarter, temperatur o.s.v. För att kunna genomföra geografiska analyser som tar hänsyn till attributens kontinuerliga natur, så krävs även att medlemsfunktionerna kan anta alla möjliga värden mellan 0 och 1. (Burrough & McDonnel 1998)

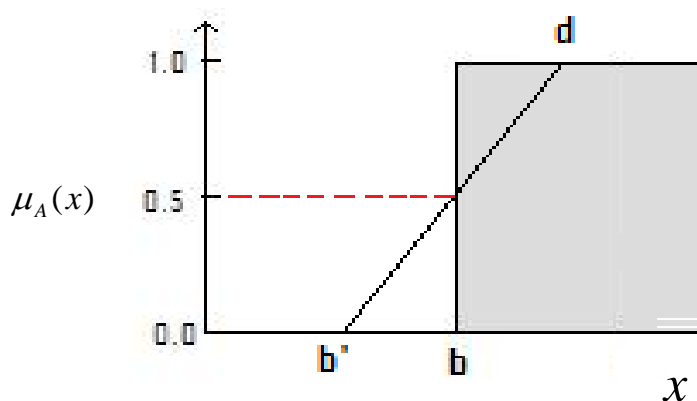
### **Oskarpt k – medel- och SI metoden**

Det finns två olika metoder för att ta fram kontinuerliga medlemsklasser. Den ena metoden använder inte medlemsfunktioner utan utnyttjar istället den rumsliga fördelningen av den studerade faktorn. Utifrån detta tas stokastiska samband fram som omvandlas till olika klasser av medlemskap (McBratney & Odeh 1997). Metoden är känd som oskarpt k – medel och används då det inte finns någon kännedom om hur faktorerna skall grupperas, för noggrannare beskrivning hänvisas till McBratney & Odeh (1997). Då det finns tillgång till sakkunnig expertis och kännedom om hur faktorerna skall grupperas sinsemellan, så nyttjas istället den semantiska import (SI) metoden (Burrough 1989). Med utgångspunkt från subjektivt satta gränser för medlemskap, skapas en funktion som beskriver övergången mellan gränserna. Utseendet på funktionskurvan kan vara linjär, sfärisk, exponentiell, sigmodal o.s.v. beroende på vilken funktion som bäst beskriver den rumsliga förekomsten in situ. (Eastman 2006)

### Medlemsuppställning enligt SI metoden

Den oskarpa medlemsfunktionen har som den booleska medlemsfunktionen en stor subjektivitetsinfluens i valet av gränser. I uppställningen av funktionen måste övergången till funktionens maxvärde definieras dvs. värdet 1, samt den punkt i funktionskurvan som erhåller ett värde på 0,5 d.v.s. ett s.k. tröskelvärde. Förutom det ska minimum värdet bestämmas d.v.s. där funktionsvärdet är 0. Om funktionen är tvåsidig krävs det att samtliga gränser definieras för båda sidor. Funktionskurvan behöver inte vara symmetrisk, den kan ha olika utseende på de olika sidorna. (Burrough & McDonnel 1998)

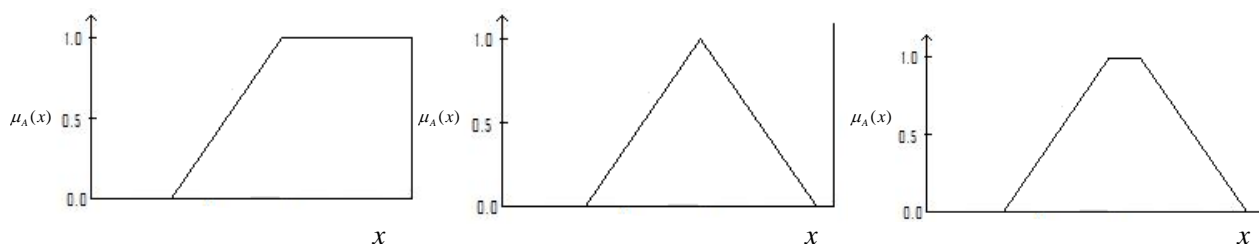
Det är brukligt att placera gränserna för den oskarpa medlemsfunktionen i relation till den booleska avgränsningen, så att tröskelvärdet skär vid den abrupta gränsen. Genom att tilldela funktionen antingen ett max eller min värde erhålls motstående värde och funktionen blir fullständig, se figur 3. (Burrough & McDonnel 1998)



Figur 3. Bilden illustrerar en oskarp medlemsuppställning, enligt Burrough & McDonnel (1998) bör tröskelvärdet dvs. 0.5 placeras så att den skär motsvarande boolesk gräns, i bilden gränsen b. Det övre värdet d justeras till den gräns där fullständigt medlemskap uppnås och därmed erhålls det lägre värdet b' som följd eller vice versa. (Skapad av Eriksson utifrån Burrough & McDonnel (1998))

### Linjära medlemsfunktioner

I valet av medlemsfunktionerna ska hänsyn tas till vilken typ av funktion som bäst beskriver verkligheten. T.ex. om kostnaden för en fabrik ökar linjärt med avstånd från vägar så är det skäligt att använda en linjär medlemsfunktion (Eastman et al 1995). Den linjära medlemsfunktionen har en linjär funktionskurva mellan extremvärdena 0 och 1, med antingen en positiv eller negativ koefficient. Medlemsfunktionen kan vara ensidig, tvåsidig eller trapetsformad, se figur 4. Den principiella formeln för den linjära medlemsfunktionen ses i formel 5, där intervallet mellan gränserna för fullständigt medlemskap och inget medlemskap beskrivs med en linjär funktion. (Eastman 2006)



Figur 4. Diagrammen visar konceptuella bilder av linjära medlemsuppställningar, diagrammet till vänster illustrerar en ensidig linjär medlemsfunktion, diagrammet i mitten visar en tvåsidig linjär medlemsfunktion och diagrammet till höger visar en trapetsformad linjär medlemsfunktion. (Skapad av Eriksson utifrån Eastman(2006))

$$\mu_A(x) = 0, x \leq b$$

$$\mu_A(x) = \frac{x-b}{c-b}, b < x < c \quad x \in X$$

$$\mu_A(x) = 1, x \geq c$$

$\mu_A(x)$  = Medlemsfunktion av variabeln x

x = Variabel

X = Talmängd

b, c = Satta gränser där medlemsfunktionen ändrar värde

Formel 5. Principiell formel för linjär medlemsfunktion. I intervallet mellan 0 och 1 anpassas en kontinuerlig linjär funktion som har en positiv koefficient och stiger från 0 i gränsen b till 1 i gränsen c.

### Sigmodiala medlemsfunktioner

Den förmodligen mest nyttjade medlemsfunktionen är den sigmodiala, även kallad S-format (Eastman 2006). Funktionen har ett normalfördelat utseende och används flitigt för att klassificera faktorer i naturen som har en normalfördelad utbredning, t.ex. olika jordar (McBratney & Odeh 1997) och typer av vegetation (Burrough & McDonnell 1998). I formel 6 beskrivs den sigmodiala medlemsfunktionen, där parametern a bestämmer utseendet på kurvan. Parameter a bör justeras så att den skär den booleska gränsen, se figur 2, vid funktionsvärdet 0,5 (Burrough 1989), se figur 2. Parametern c anger var funktionsvärdet blir 1 dvs. var funktionskurvan når sin maximalpunkt. Exponenten på termen (x - c) justeras för att öka spridningen på kurvan (Burrough 1989). Funktionen kan i likhet med den linjära vara ensidig, tvåsidig samt trapetsformad, se figur 5 (Eastman 2006).

$$\mu_A(x) = 0, x < b$$

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1+a(x-c)^2}, b < x < c \quad x \in X$$

$$\mu_A(x) = 1, x \leq c$$

$\mu_A(x)$  = Medlemsfunktion av variabeln x

x = Variabel

X = Talmängd

a = parameter som justerar skärning mot tröskelvärdet

c = Maxvärdet på x i funktionen dvs. där  $\mu_A(x) = 1$

Formel 6. Principiell formel för sigmodial medlemsfunktion. I intervallet mellan 0 och 1 anpassas en kontinuerlig normalfördelad funktion som har en positiv ökning och stiger från 0 i gränsen b till 1 i gränsen c med ett S-format utseende.



Figur 5. Figuren visar konceptuella diagram av sigmodiala medlemsuppställningar. Diagrammet till vänster illustrerar en ensidig sigmodial medlemsfunktion. Diagrammet i mitten visar en tvåsidig sigmodial medlemsfunktion och diagrammet till höger visar en trapetsformad sigmodial medlemsfunktion. (Skapad av Eriksson utifrån Eastman(2006))

## Övriga medlemsfunktioner

I vissa förekommande fall föreligger ett exponentiellt samband mellan medlemsfunktionen och den undersökta faktorn (Eastman 2006). I sådana fall tilldelas funktionskurvan som anger medlemskapet ett J-format eller exponentiellt utseende.

Då det inte finns samband mellan faktorn och medlemskap som kan beskrivas med ovanstående funktioner, kan en mer avancerad medlemsfunktion nyttjas. Ett valfritt antal kontrollpunkter tas fram som symboliserar samband mellan medlemsklassningen och faktorns attribut. Därefter interpoleras funktionsvärden mellan kontrollpunkterna fram. Jämfört med de andra medlemsfunktionerna så erhåller funktionskurvan ett oregelbundet utseende. Fördelen är att funktionen är framtagen unikt för det avsedda syftet. Nackdelen är att funktionen blir väldigt känslig för förändringar i attributdata. Detta gör att en framtagen funktion som passar bra på ett geografiskt område kanske inte alls passar på ett annat. (Eastman 2006)

## 2.3 Kombination av faktorer vid flerfaktorsutvärdering

För att beskriva lämpligheten för ett visst intresse behöver ofta ett flertal faktorer kombineras, detta görs med en så kallad flerfaktorsutvärdering (Carver 1991). Det finns ett antal alternativ för att kombinera faktorerna för att få fram en lämplighet.

### 2.3.1 Boolesk AND och OR

Två av de enklaste kombinationsmetoderna är booleska AND och OR. Vid valet av metod bör hänsyn tas till hur stor risk man vill ta. Risken kan minimeras genom att låta den faktor som har lägst lämplighet bestämma eller maximeras genom att låta den faktor som har högst lämplighet bestämma. För att minimera risken görs en så kallad AND-operation. Detta innebär att en överlagring görs mellan lager med värdena 0 och 1 i varje cell. Det resulterande lagret får värdet 1 endast i de celler där samtliga lager har värdet 1, vilket illustreras i figur 6. En AND-operation kan likställas med ett lågt risktagande eftersom alla faktorer måste vara uppfyllda. Skall risktagandet istället maximeras används en OR-operation. Till motsats från en AND operation räcker det med att ett lager har värde på 1 i cellen, för att den resulterande cellen ska vara godkänd. Detta innebär ett högt risktagande eftersom endast en av faktorerna behöver vara uppfylld. Figur 7 visar en boolesk OR-operation.

1	0	0
1	1	0
1	1	0

 AND 

0	1	1
0	1	1
0	1	1

 = 

0	0	0
0	1	0
0	1	0

Figur 6. Två raster överlagras genom en boolesk AND och det resulterande rastret får värdet ett i de celler där båda överlagringslagren har värdet 1. Det lägsta värdet för varje cell väljs ut. (Skapad av Mattisson utifrån Eklundh et al. 2003)

0	0	1
0	1	1
0	1	0

 OR 

1	0	0
1	1	0
0	1	0

 = 

1	0	1
1	1	1
0	1	0

Figur 7. Två raster överlagras genom en boolesk OR och det resulterande rastret får värdet ett där ett av överlagringslagren har värdet 1. Det högsta värdet för varje cell väljs ut. (Skapad av Mattisson utifrån Eklundh et al. 2003)

### 2.3.2 Oskarp AND och OR

Principen för oskarp AND och OR är den samma som för booleska AND och OR. Om en AND överlagring görs på ett antal oskarpa lager väljs värdet i det resulterande lagret, som det lägsta cellvärdet för de olika lagren, vilket visas i figur 8. Vid oskarp OR väljs det högsta värdet för de olika faktorerna i cellen, vilket visas i figur 9. Precis som vid boolesk överlagring innebär AND ett lågt och OR ett högt risktagande. Både boolesk och oskarp AND och OR ger en onyanserad bild av verkligheten.(Eklundh 2003)

5	7	7	AND	4	9	9	=	4	7	7
4	5	5		5	4	7		4	4	5
5	4	9		9	9	5		5	4	5

Figur 8. Två raster överlagras med oskarp AND och det resulterande rastret får cellvärdena från det raster som har lägst värde.(Skapad av Mattisson utifrån Eklundh et al. 2003)

5	7	7	OR	4	9	9	=	5	9	9
4	5	5		5	4	7		5	5	7
5	4	9		9	9	5		9	9	9

Figur 9. Två raster överlagras ihop med oskarp OR och det resulterande rastret får cellvärdena från det raster som har högst värde.(Skapad av Mattisson utifrån Eklundh et al. 2003)

### 2.3.3 Oskarp produkt och algebraisk summa

En annan metod för att minimera risktagandet är oskarp produkt. Vid oskarp produkt multipliceras värdena från de olika lagren, i varje cell, för att få fram en lämplighet. Lämpligheten kommer alltid att vara lägre eller lika med värdet för den lägsta faktorn. Lämpligheten blir en sammanvägning av de olika faktorerna. Oskarp produkt är en metod som med fördel kan användas vid riskhantering, t.ex. för att bestämma en lämplig plats för lokalisering av ett kärnkraftverk. Eftersom varje faktor med ett medlemskap lägre än 1 bidrar till att sänka lämpligheten, blir risktagandet litet. Beräkningsmetod för oskarp produkt illustreras i formel 7.(Eklundh 2003)

$$\prod_{i=1}^n \mu_i$$

Formel 7. För oskarp produkt bestäms den totala lämpligheten för varje cell genom att värdena från medlemsfunktionerna för de olika faktorerna multipliceras.  $\mu$  står för medlemsfunktionens värde.

Om varje faktor som har ett medlemskap större än 0 ska bidra positivt till lämpligheten, kan oskarp algebraisk summa användas. Oskarp algebraisk summa ger en lämplighet som alltid är större eller lika med den högsta faktorn. Eftersom varje faktor som är större än noll bidrar positivt är det en bra metod att använda vid risktagning t.ex. vilka platser är lämpliga för att vaska guld längst en å. Beräkningsmetoden för oskarp algebraisk summa illustreras i formel 8. Formeln utgår ifrån 1, d.v.s. fullständig lämplighet, från detta subtraheras produkten av 1 minus medlemsfunktionens värde för de olika faktorerna. T.ex. vi har tre faktorer med

medlemsfunktionsvärdena 0,3, 0,5 och 0,9. Innan värdena multipliceras subtraheras medlemsfunktionsvärdena från 1, vilket resulterar i 0,7, 0,5, 0,1. Dessa värden multipliceras och ger produkten 0,035. Produkten dras sedan av från 1 och ger en lämplighet på 0,965.

$$1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

Formel 8. Alla faktorer som har ett medlemsfunktionsvärde som är större noll bidrar positivt till lämpligheten vid oskarp summa.  $\mu$  står för medlemsfunktionens värde.

### 2.3.4 Viktad linjär kombination

För att varken vara risktagande eller riskundvikande kan viktad linjär kombination användas vid överlagring för oskarp logik. Enligt Burrough och McDonnel (1998) används metoden då sambandet mellan faktorerna kan förklaras med språkliga uttryck som typiska och väsentliga, eller när olika faktorer kan kompensera för varandra (P. Burrough och R. McDonnel, 1998). I metoden tilldelas varje faktor en viktning, beroende på hur stor påverkan den har i förhållande till de andra faktorerna. Värdena för alla viktningar skall summera till ett.

#### Bestämning av viktning

Det finns flera sätt att ta fram viktningen för faktorerna. En relativt enkel metod för att bestämma viktningen är att relatera de olika faktorernas inverkan på hela setet. Varje faktor tilldelas en vikt, där vikten tas fram i relation till alla faktorer samtidigt. Om det finns fler än ett fåtal faktorer bör man använda sig av en annan metod, p.g.a. att det blir svårt att fördela vikterna med hänsyn till hela setet (Eastman 2006). Ett exempel på en sådan metod är Saaty's (1990) metod för bestämning av viktning genom parvis jämförelse. Parvis viktning ingår i den så kallade Analytiska Hierarkiska Processen (AHP) som togs fram av Saaty (1980). I AHP skapas en hierarki med viktningar på flera olika nivåer. Kostnaden och nyttan för en lokalisering är exempel på en toppnivå som i sin tur kan delas upp i lägre nivåer. Nivåuppdelningen kan ske i flera olika steg. För att kunna jämföra faktorerna parvis behöver förhållandet mellan vilken av faktorerna som är viktigast bestämmas och hur mycket viktigare den är (Saaty och Vargas 1987). Enligt Saaty's (1990) metod anges förhållanden mellan de olika faktorerna på en skala mellan 1 och 9, vilket visas i figur 10. På skalan anger 1 att de två faktorerna är lika viktiga och 9 att den ena faktorn är extremt mycket viktigare än den andra.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremt	Mycket starkt	Starkt	Måttligt	Lika	Måttligt	Starkt	Mycket starkt	Extremt
	Mindre viktigt				Viktigare			

Figur 10. Saaty (1990) anger förhållandet mellan två faktorer på en skala 1 till 9 i sin metod för sin bestämning av vikter genom parvis jämförelse.

Resultatet av dessa jämförelser blir en matris där förhållanden mellan de olika faktorerna återges. Tabell 1 visar ett exempel på en parvis jämförelse mellan de tre faktorerna A, B och C. Översta raden visar hur A förhåller sig till de båda faktorerna B och C. A förhåller sig lika mot A, är starkt viktigare än B och måttligt viktigare än C. Andra raden visar att B är starkt mindre viktigt än A, förhåller sig lika mot B och är måttligt mindre viktigt än C. Tredje och sista raden visar att C är måttligt mindre viktig än A, måttligt viktigare än B och förhåller sig lika mot C. Nedre delen av tabellen, under faktorernas jämförelse mot sig själva, är en spegling av den övre delen av tabellen.

Faktor	A	B	C
A	1	5	3
B	1/5	1	1/3
C	1/3	3	1

Tabell 1. Tabellen visar hur faktorerna A, B, och C förhåller sig mot varandra. Varje rad beskriver hur faktorn till vänster i raden förhåller sig till övriga faktorer. Förhållandena faktorerna emellan beskrivs med hjälp av en skala framtagen av Saaty (1990).

I Saatys (1990) metod beräknas den sammanvägda viktningen med hjälp av egenvektorer. För en god approximation kan en enklare metod användas (Eastman et al 1997). Efter att tabellen med parvis jämförelse tagits fram, summeras kolumnvärdena för varje kolumn i tabellen. Varje cellvärde divideras sedan med kolumnens sammanlagda värde. Detta resulterar i att varje kolumn får ett eget viktningsset. (Weight 2006) Tabell 2 visar de framräknade viktningsseten.

Faktor	A	B	C
A	0,65	0,56	0,69
B	0,13	0,11	0,08
C	0,22	0,33	0,23
	1	1	1

Tabell 2. Varje kolumn i tabellen står för ett viktningsset mellan faktorerna A, B och C som summerar till 1. Viktningsseten är framtagna från parvisa jämförelse mellan faktorerna.

För att få fram ett sammanvägt viktningsset summeras viktningarna för varje rad och delas med antalet kolumner. Faktor A får t.ex. viktningarna 0,65 0,56 och 0,69 i de tre olika viktningsseten. Dessa viktningar summeras ihop till 1,9 och divideras därefter med 3, vilket ger ett medelvärde. Medelvärdet i detta fall blir 0,63 och är slutvikten för faktor A. Samma sak upprepas för samtliga faktorer.

Eftersom man tar fram förhållanden mellan de olika faktorerna sinsemellan kan det hända att dessa förhållanden inte blir konsekventa (Saaty 1990). Saaty har därför tagit fram en metod för att statistiskt testa om viktningarna är korrekta. Denna metod kallas för CR-kvot (consistency ratio), vilket står för konsekvenskvot. Med hjälp av denna kvot visas hur konsekvent den parvisa jämförelse utförts, både hela setet och för enskilda faktorer.

### **Lämplighet**

För att ta fram en slutlig lämplighet för varje cell multipliceras medlemsfunktionsvärdena med de framtagna viktningarna och summeras enligt formel 9 (Eastman et al. 1995).

$$L = \sum v_i * x_i$$

$L$  = Lämplighet

$v_i$  = Viktat värde

$x_i$  = Standardiserat värde för kriteriet

Formel 9. Beskriver lämpligheten för viktad linjär kombination.  $L$  står för lämplighet,  $v_i$  för viktat värde och  $x_i$  är standardiserat värde för kriteriet.

Värdet ligger mellan 0 och 1, där 1 anger fullständig lämplighet och 0 fullständig olämplighet. I de fall där begränsande booleska faktorer förekommer kan dessa multipliceras med lagret över lämplighet som fås fram vid viktad linjär kombination. Resultatet blir ett lager över lämplighet där områden med begränsande faktorer har tagits bort. Formel 10 illustrerar denna beräkning. (Eastman et al. 1995)

$$L = \sum v_i * x_i * \prod b_i$$

$\prod$  = Produkten

$b_i$  = värde för begränsande faktor i

Formel 10: Formel för linjär viktad kombination med booleska begränsande faktorer inkluderade. De booleska värdena för de begränsande faktorerna multipliceras med den viktade lämpligheten, på så vis exkluderas helt begränsade områden.

### 2.3.5 Ordnat viktat medel

Viktad linjär kombination beskrivs som en mellanväg för AND och OR, metoden är varken risktagande eller riskundvikande. En metod som använder sig av principerna hos viktad linjär kombination och ändå kan påverka sitt risktagande är ordnat viktat medel. Metoden ger möjlighet att kontinuerligt styra risktagandet från lågt (AND) till högt (OR) (Eastman and Hong 2000). Denna metod använder sig av ytterligare ett steg av viktning som påverkar hur stort risktagandet är.

I viktad linjär kombination bestämmer viktningen hos en faktor vilket inflytande faktorn har gentemot de andra ingående faktorerna, på den totala lämpligheten. En faktor med hög viktning kan kompensera för andra faktorer som har lågt medlemskap, trots att medlemsvärdet för faktorn med hög viktning inte är högt. Däremot kan en faktor med låg viktning inte kompensera så mycket, trots att medlemsvärdet är högt (Eastman 2006). Ordnat viktat medel använder ytterligare en viktning utöver den som används i viktad linjär kombination, en så kallad rangordningsviktning. Rangordningsviktningarna skiljer sig från viktningarna i viktad linjär kombination genom att de inte är direkt relaterade till ett attribut, utan istället en rangordning (Yager 1988). Denna viktning gör det möjligt att styra risktagandet i analysen. I varje cell görs en rangordning som baseras på lämplighetsvärdet för de olika faktorerna. Den faktor som har den lägsta lämpligheten får rankingen 1, den med näst lägst 2 o.s.v. Beroende på ranking tilldelas en ny viktning och precis som viktningen i viktad linjär kombination måste dessa viktningensvärden summera till 1.

Exempelvis kan de tre faktorerna A, B och C kombineras med varandra. Värderna från medlemsfunktionerna, d.v.s. de standardiserade värdena, för dessa faktorer i en cell är A=0,15 B=0,12 och C=0,23. Antag att de tre faktorerna anses påverka lämpligheten lika mycket och därför har samma viktning 0,33. Rangordningen för denna cell blir B, A, C. Risktagandet kan nu påverkas genom att rangordningen viktas, vilket påverkar den slutliga lämpligheten för cellen. Tabell 3 visar fem fall av olika viktning för de tre faktorerna A, B och C.



Fall	Rangordningsviktning			Lämplighet
	Riskundvikande (1)	(2)	Rishtagande (3)	
1	1	0	0	0,12
2	0,8	0,2	0	0,126
3	0,33	0,33	0,33	0,165
4	0,2	0,3	0,5	0,184
5	0	0	1	0,23

Tabell 3. Genom att ändra rangordningsviktningarna kan rishtagandet påverkas. Tabellen visar fem olika fall då viktningen satts olika. Fall 1 innebär minst rishtagande vilket sedan ökar till fall 5, där rishtagandet är maximalt.

I fall 1 väljs att vara helt riskundvikande vilket är detsamma som oskarp AND. Endast den lägst rankade faktorn kommer att få inflytande på den slutliga lämpligheten. I fall 2 tas en viss hänsyn till den näst lägst rankade faktorn, vilket gör att lämpligheten kommer att stiga något. För att få samma påverkan från alla tre faktorerna kan rangordningsviktningen sättas till 0,33 för alla faktorer. Detta innebär att rishtagandet blir precis mittemellan AND och OR. Vilket i sin tur innebär att lämpligheten efter multiplikation med rangordningsviktningen inte skiljer sig från viktad linjär kombination med lika viktningar. Risktagandet är ganska stort i fall 4 men övriga två faktorer har fortfarande inflytande på den slutliga lämpligheten. För att maximera rishtagandet sätts rangordningsviktningarna enligt fall 5. Dessa fem fall är endast exempel för att klargöra hur rishtagandet kan påverkas, det går att ändra rangordningsviktningarna kontinuerligt så länge dessa summerar till ett. (Eastman 2006)

### 3. Metodutveckling

Utgångspunkt i litteratursökningen för oskarp logik har varit manualen i IDRISI Andes (Clark labs 2006), som är skriven av Eastman (2007). Valet av IDRISI manualen som utgångspunkt baseras på rekommendationer samt att IDRISI är ett GIS-program som ligger långt fram i utvecklingen av verktyg för att hantera oskarp logik. Därefter lästes artiklar skrivna av författare som ofta nämnts i andra relaterande artiklar och referenslistor. Teorikunskaperna som krävdes inom vindkraft och vindkraftslokaliseringsproblematik inhämtades främst från rapporter skrivna av statliga myndigheter, länsstyrelser och kommuner. För att kunna tillämpa metoden och göra den repeterbar användes modellbyggaren i GIS-programmet ArcGis (ESRI Inc. 2006). ArcGis valdes med hänseende på att detta är en programvara SWECO Position använder sig av. Med hjälp av ett flödesschema skapades en modell som sedan kan köras upprepade gånger. Fortlöpande under arbetsgången har en diskussion förts med våra handledare och sakkunniga på SWECO angående metoden. Frågeställningar som diskuterats har främst rört val av ingående faktorer och ingående data.

#### 3.1 Faktorer

Faktorerna togs fram i samråd med sakkunniga på SWECO samt utifrån tidigare gjorda analyser och rekommendationer av bl.a. Länsstyrelsen, Boverket, Energimyndigheten och Vindbruksrådet.

Faktorer i metoden:

- Medelvindhastighet
- Avstånd till regionnät
- Avstånd till vägar
- Avstånd till bebyggelse
- Natura 2000-områden
- Strandskyddsområde till vattendrag

### 3.1.1 Oskarpa faktorer

En förutsättning för att placera ut ett vindkraftverk är att det finns tillgång till vind och att den är tillräckligt stark. Ur ekonomiskt perspektiv kommer lämpligheten för att anlägga ett vindkraftverk vara en avvägning mellan kostnaden att bygga verket och vinsten som kan göras. Vindhastighet är en mycket stark bidragande faktor till var vindkraftverk skall lokaliseras. Dagens vindkraftverk är konstruerade för att generera energi för vindhastigheter mellan 4-25 m/s. Är vindhastigheten lägre än 4 m/s anses energivinningen bli för låg och är hastigheten över 25 m/s föreligger en säkerhetsrisk. Optimal energiutvinning sker vid en hastighet på runt 12-14 m/s.(Uusmann 2007)

I Sverige finns en indelning av elnätet i tre nivåer stamlednings-, regionallednings- och lokaledningsnät. Stamnätet är stommen i det svenska kraftnätet, där överförs mycket stora effekter och spänningar. Det fungerar som en länk mellan produktionsanläggningar, nationella nätet och andra länder. Regionnäten är nivån under stamnäten, dessa nät är begränsade till ett geografiskt område. Regionnäten fungerar som en länk mellan stamnätet och lokalnäten. Längst ner i kedjan finns lokalnäten, mot vilket slutkunder normalt är anslutna till.(Vindkraft - Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007) Enligt Länsstyrelsen i Skåne producerar ett vindkraftverk som har en rotordiameter på 80m och en navhöjd på 80m i genomsnitt en effekt på 2 MW. Detta ger en totalhöjd på 120m(Lepic och Fagerström 2006). I energimyndighetens broschyr anges att parker mellan ca 10 MW och 100 MW normalt ansluts till regionnätet (Vindkraft - Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007), vilket innebär att analysen främst är anpassad för anläggandet av minst fem vindkraftverk tillsammans och uppåt.

Närhet till vägar är en av förutsättningarna för att det ska vara ekonomisk lönsamt att anlägga vindkraftverk. För att konstruera vindkraftverk krävs tillgång till vägar som har en viss kvalitet i avseende på axeltryck och bredd, då det är stora delar som ska transporteras ut till vindkraftsbygget (Uusmann 2007). Placering av vindkraftverk i direkt anslutning till vägar innebär dock en säkerhetsrisk. Risken finns att verken kollapsar under stormiga förhållanden och rasar över vägen. Under underkylda förhållanden kan is på rotorbladen lossna och slungas ut på vägen. Dessutom upplever en del bilister vindkraftverken som distraherande (Lepic och Fagerström 2006).

Avståndet till bebyggelse ska symbolisera de obekväma upplevelser människor får av ett vindkraftverk i närområdet där de bor, i form av audiovisuella intryck. Det visuella intrycket styrs mycket av hur ögat uppfattar vindkraften som en helhet i landskapet (Vindbruksplan för Kristianstads kommun 2007). Ljudnivån som riktas mot ett hus avtar med avståndet från ett vindkraftverk och är beroende av markens egenskaper och rådande vindriktning. Ljud transporteras relativt dåligt i jord och den huvudsakliga störningskällan är det vinande ljud som upplevs då vinden passerar bladen (Vindkraft på land 2006).

### 3.1.2 Booleska faktorer

Natura 2000-områden är ett nätverk av skyddsvärda områden runt om i EU, vilket inkluderar allt från korkekslundar i Spanien till groddammar i Sverige (Vindkraft på land 2006). Naturvårdsverket är den myndighet som sköter om och ansvarar för de svenska områdena. I nuläget finns det nära 4100 områden i Sverige som klassats som Natura 2000-områden och fler väntas att ingå inom en snar framtid. Etablering av vindkraft bedöms uteslutet inom Natura 2000-områden trots att vissa områden bedöms mer känsliga än andra (Lepic och Fagerström 2006). I analysen togs alla potentiella områden bort för vindkraftslokalisering som låg inom ett Natura 2000-område.

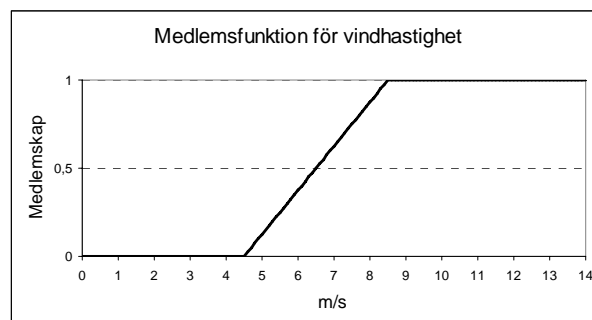
Etablering av byggnader inom 100m från vattendrag oavsett storlek bedöms uteslutet. Det finns en önskan om att bevara stränderna invid sjöarna från exploatering, både av friluft- och miljöskäl. Därför har lagen om strandskydd kommit till. För att bygga inom 100m från vattendrag krävs särskild dispens, vilket är en svår tillståndsprocess (Våra stränder och bestämmelser om strandskydd 2002). Därmed användes 100m från vattendrag för fullständig olämplighet.

Eftersom det finns satta gränser för uteslutna områden för några av de oskarpa faktorerna p.g.a. säkerhetsaspekter, valdes dessa gränser som booleska gränser. Avstånd till vägar och regionnät har en minsta säkerhetsgräns på 50m (Uusmann 2007). För bebyggelse går motsvarande gräns på 400m avstånd ifrån bostäder (Uusmann 2007). Säkerhetsgränserna utnyttjades i metoden som booleska gränser.

## 3.2 Medlemsfunktioner för de oskarpa faktorerna

### 3.2.1 Vindhastighet

Eftersom vindhastigheten varierar på en plats över tid, baseras medlemsfunktionen på en medelvindhastighet. I uppmätta data över hela Sverige varierar medelvindhastigheten från 2 till 10,5 m/s. Den övre gränsen, d.v.s. gränsen för fullständigt medlemskap, sattes vid 8,5 m/s baserat på att områden med högre medelvindhastighet i Sverige endast finns i fjällkedjan. Tröskelvärdet för medlemsfunktionen sattes till 6,5 m/s baserat på tidigare booleska analyser gjorda av SWECO Position. Samt att Energimyndigheten använt sig av denna gräns som lägsta gräns vid framtagandet av områden av riksintresse för vindkraft. För enkelhetens skull användes en linjär medlemsfunktion. Gränsen för total olämplighet blev då 4,5 m/s, eftersom medlemsfunktionen var linjär, vilket med viss marginal är högre än gränsen på 4 m/s då moderna vindkraftverk slutar att producera el (Uusmann 2007). Medlemsfunktionen för medelvindhastigheten visas i figur 11.

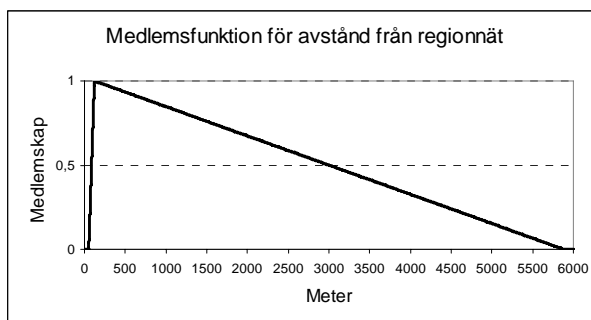


Figur 11. Figuren visar medlemsfunktionen för vindhastighet. Diagrammet beskriver medlemskapet mellan 0 och 1, där 1 står för fullständigt medlemskap. Den nedre gränsen för medlemskap går vid 4,5m/s och ökar sedan linjärt till 8,5m/s där fullständigt medlemskap uppnås. Tröskelvärdet, det vill säga ett medlemskap på 0,5, sattes till 6,5m/s.

### 3.2.2 Avstånd till regionnät

Gränsen för fullständig olämplighet gällande avstånd till regionnät sattes till 50m. Detta värde baseras på uppgifter från Länsstyrelsen i Skåne där etablering av vindkraft inom 50m från ledningar bedöms vara uteslutna (Lepic och Fagerström 2006). Enligt en rapport från Boverket bör en utvärdering ske före tillstånd ges att placera ett vindkraftverk närmare en kraftledning än dess totala höjd (Uusmann 2007). Därför valdes ett linjärt ökande medlemskap från 50m och upp till verkens totalhöjd på 120m. Vid 120m ifrån regionnätet har vi en fullständig lämplighet som sedan avtar linjärt med avstånd till 5880m. Detta avstånd

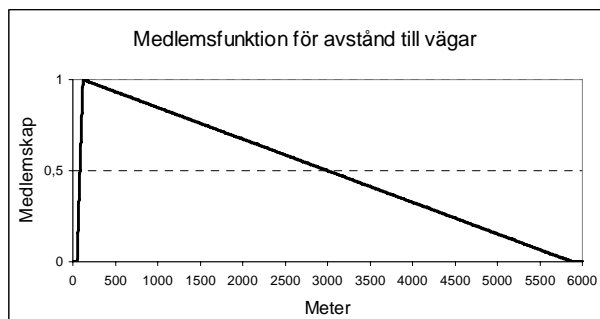
valdes eftersom SWECO Position i tidigare booleska analyser använt 3000m som sin gräns. Ett linjärt avtagande medlemskap valdes beroende på ökad kostnad eftersom Eastman (1995) i en tidigare analys, avseende kostnaden för anläggandet av kraftnät till en fabrik, använt sig av detta samband. Figur 12 visar medlemsfunktion för avstånd från regionnät.



Figur 12. Figuren visar medlemsfunktionen för avstånd från regionledning. Diagrammet beskriver medlemskapet mellan 0 och 1, där 1 står för fullständigt medlemskap. Den nedre gränsen för medlemskap går vid 50m och ökar sedan linjärt till 120m där fullständigt medlemskap uppnås. Från 120m avtar sedan medlemskapet linjärt till 5880m. Tröskelvärdet, det vill säga ett medlemskap på 0,5, sattes till 3000m

### 3.2.3 Avstånd till vägar

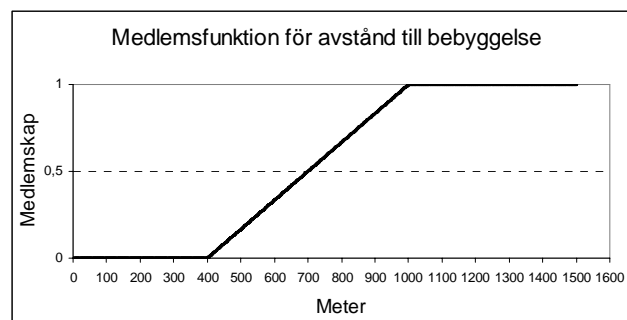
Vägverket rekommenderar ett minsta avstånd till vägar på 50m, oavsett vägtyp (Uusmann 2007), därför sattes denna gräns för fullständig olämplighet i medlemsfunktionen. Vägverket anser även att ett avstånd som motsvarar verkets totalhöjd bör tas i beaktande (Uusmann 2007), d.v.s. navhöjden plus halva rotordiametern. Totalhöjden var som tidigare beskrivits 120m. Därmed sattes 120m som den översta gränsen för total lämplighet. Då är det tillräckligt långt från vägarna ur säkerhetssynpunkt samt att anläggningskostnaderna hålls så låga som möjligt. Precis som med avstånd till kraftnätet minskar lönsamheten att anlägga ett verk med hur pass hög anläggningskostnaden blir. Eftersom det är en komplex kostnadskalkyl att anlägga vägar som är till stor del beroende av topografi, geologi, äganderätt av marken o.s.v. använde vi samma gräns för tröskelvärdet som medlemsfunktionen för avstånd till regionnätet, dvs. 3km. Därmed blev den lägsta gränsen för medlemskap 5880m. Enligt en studie som utförts i Italien och Schweiz, avseende vindkraftslokalisering, med booleska gränser så angavs också en boolesk gräns på 3km (Ehrenreich 2005), alltså är det ett rimligt antagande att ange detta som ett tröskelvärde i vår medlemsfunktion över avstånd till vägar. En linjär medlemsfunktion användes, vilket också använts i tidigare analyser gjorda på vindkraftslokalisering (Hansen 2005). Medlemsfunktionen för avstånd till vägar visas i figur 13.



Figur 13. Figuren visar medlemsfunktionen för avstånd från vägar. Diagrammet beskriver medlemskapet mellan 0 och 1, där 1 står för fullständigt medlemskap. Den nedre gränsen för medlemskap går vid 50m och ökar sedan linjärt till 120m där fullständigt medlemskap uppnås. Från 120m avtar sedan medlemskapet linjärt till 5880m. Tröskelvärdet, det vill säga ett medlemskap på 0,5, sattes till 3000m

### 3.2.4 Avstånd till bebyggelse

Naturvårdsverket rekommenderar riktlinjer på 40dB som får riktas mot en utomhusbyggnad. Enligt beräkningsmodeller, för med vilket avstånd från ett vindkraftverk 40dB uppnås, motsvarar 40dB ett ungefärligt avstånd < 350m (Pedersen & Persson Waye 2002). Enligt byggnadsnämnden (Uusmann 2007) föreslås en flexibel skyddszon från 500m till 1000m från byggnader, utifrån parametrar som buller, skuggförhållande och den visuella effekten. Ett fall i miljööverdomstolen M 8782-99 fastslog att ett minsta avstånd på 400m för konstruktion av vindkraft skulle användas. Av den orsaken användes detta värdet som den nedre gränsen för fullständig olämplighet i medlemsfunktionen (Vindkraftverk på land 2006). Gränsen på 400m, istället för 500m, sattes för att inte förlora områden som kan anses vara möjliga att bygga vindkraftverk om prövning ges. Den övre gränsen för när ljud och visuella störningar inte längre anses vara i konflikt med vindkraftslokaliseringar sattes till 1000m. Detta är det största hänsynsavståndet enligt Boverket (Uusmann 2007). Medlemsfunktionen för avstånd till bebyggelse definierades därmed till följande gränser. Under 400m tilldelas 0 i medlemskap i enlighet med miljödomstolens beslut, ett linjärt ökande medlemskap från 0 till 1 mellan 400m och 1000m. Slutligen ett medlemskap på 1 för alla avstånd över 1000m, se figur 14. I Hansens (2005) studie har på samma sätt avstånd till bebyggelse beskrivits med en linjär medlemsfunktion vilket stärker valet av medlemsfunktion. Tröskelvärdet på 700m ligger nära den booleska gräns på 750m från byggnader som Elforsk använt sig av i sin forskningsrapport om vindkraft (Blomqvist 2008).



Figur 14. Figuren visar medlemsfunktionen över avstånd från bebyggelse. Diagrammet beskriver medlemskapet mellan 0 och 1, där 1 står för fullständigt medlemskap. Den nedre gränsen för medlemskap går vid 400m och ökar sedan linjärt till 1000m där fullständigt medlemskap uppnås.

### 3.3 Metod för viktning

I undersökningen användes tre metoder för att ta fram viktningar. Dessa metoder var lika viktning av alla faktorer, viktning mot hela setet och parvis jämförelse. Vid lika viktning av alla faktorer tilldelades de oskarpa faktorerna viktningen 0,25. Vid viktning mot hela setet viktade två sakkunniga, Pavel Sensky (SWECO Infrastructure) och Johan Sigfrid (SWECO Position). Deras vikter summerades sedan och delades med 2 för att få fram ett medelvärde, som finns redovisade i tabell 4.

Faktor	Slutvikt
Vind	0,500
Avstånd till Bebyggelse	0,225
Avstånd till Vägar	0,150
Avstånd till Kraftnät	0,125

Tabell 4. Tabellen visar den viktningen som togs fram med viktning mot hela setet. Varje faktor viktas med hänsyn till alla samtliga faktorer och vikterna summerar till 1.

Tredje metoden för att få fram viktning var parvis jämförelse vilken togs fram i samråd med Pavel Sensky och Johan Sigfrid. Tabellen med parvis jämförelse finns redovisad i tabell 5.

Faktor	Vind	Avstånd till bebyggelse	Avstånd till vägar	Avstånd till kraftnät
Vind	1	2	4	6
Avstånd till bebyggelse	1/2	1	2	4
Avstånd till vägar	1/4	1/2	1	2
Avstånd till regionnät	1/6	1/4	1/2	1

Tabell 5. Tabellen visar parvis jämförelse mellan de ingående oskarpa faktorerna. Förhållandena faktorerna emellan beskrivs med hjälp av en skala från Saaty (1990).

Vid parvis jämförelse användes Saaty's (1990) skala mellan 1 och 9. Kolumnvärdena summerades för varje kolumn. Värdet i varje cell dividerades sedan med kolumnvärdet för att standardiseras så att hela kolumnen summerar till 1. Resultatet av dessa beräkningar blev att varje kolumn stod för ett viktningsset som redovisas i tabell 6.

Faktor	Vind	Avstånd till bebyggelse	Avstånd till vägar	Avstånd till kraftnät
Vind	0,52	0,53	0,53	0,46
Avstånd till bebyggelse	0,26	0,27	0,27	0,31
Avstånd till vägar	0,13	0,13	0,13	0,15
Avstånd till regionnät	0,09	0,07	0,07	0,08
	1	1	1	1

Tabell 6. Varje kolumn står för ett viktningsset baserat på parvis jämförelse mellan faktorerna. Viktningen hos varje faktor slås ihop för de olika seten och delas med antalet set för att få fram en slutgiltig viktning.

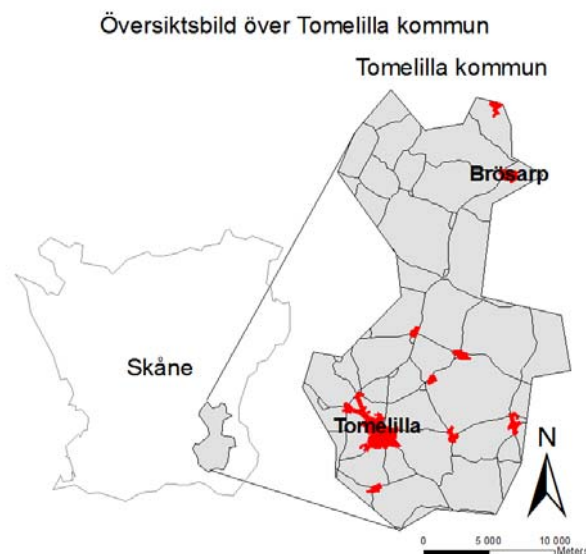
Viktningarna för varje faktor i de olika kolumnerna summerades och delas med antalet kolumner. På så sätt togs ett medelvärde av viktningen fram för varje faktor, som fick representera den slutgiltiga viktningen, se tabell 7.

Faktor	Slutvikt
Vind	0,51
Avstånd till Bebyggelse	0,28
Avstånd till Vägar	0,14
Avstånd till Kraftnät	0,07

Tabell 7. Viktning genom parvis jämförelse. Tabellen visar det framtagna viktningssetet då parvis jämförelse användes. Faktorerna jämförs en och en mot varandra för att bestämma viktning.

### 3.4 Analys av studieområdet Tomelilla

Området som valdes att testa metoden på är Tomelilla kommun, som ligger i sydöstra Skåne i Österlenregionen, se figur 15. Kommunen har drygt 13000 invånare och en yta på 400 km<sup>2</sup>. I dagsläget har Tomelilla kommun 14st vindkraftverk. Tomelilla kommun valdes som analysområde p.g.a. att kommunen har ett av 48 områden på land i Sverige som utmärkts till riksintresse för vindkraft (Riksintresse vindkraft 2008). Områdets storlek passar också bra i analysen.



Figur 15. Bilden visar Tomelilla kommun i sydöstra Skåne med de största tätorterna och vägnät från röda kartan.

### 3.4.1 Data

Största delen av data som använts i analysen kommer från Lantmäteriverkets fastighetskarta. Data från fastighetskartan är i vektorformat och har en upplösning på 1:10000. Samtliga skikt har det geodetiska referenssystemet RT 90 2.5 gon V med ett y-tillägg på 1500000. De skikt som kommer från fastighetskartan är följande:

- Bebyggelse; polygonskikt som innehåller hus, uthus och kyrkor, större än  $20 m^2$
- Kraftledningar; linjeskikt som innehåller region-, lokal- och stamledningar
- Vattendrag; polygonskikt som innehåller vattendrag större än 6m i bredd.
- Vägar; linjeskikt som innehåller allmänna vägar, enskilda vägar samt järnvägar
- Övrig bebyggelse; punktskikt som innehåller byggnader som inte finns i bebyggelseskiktet bl.a. befintliga vindkraftverk.

Data över medelvindhastigheten, Natura 2000 samt kommungränserna erhöles inte ifrån Lantmäteriverket. Data som använts som underlag för vindhastigheten kommer från en undersökning av Uppsala universitet på uppdrag av Energimyndigheten. Dataunderlag har tagits fram för medelvindar på 49, 72 och 103m höjd med en upplösning på  $1*1km$ . Vindhastigheten är framtagen i den så kallade MIUU - modellen. Modellen beräknar medelvindhastigheten i flera steg. Varje steg inkluderar prognosberäkningar av variabler som vindkomponenter i x-,y- och z-led, strålning mot markytan, luftfuktighet, turbulensparametrar o.s.v. För vidare beskrivning av modellen hänvisas till Bergström (2007). Höjden är angiven över nollplansförskjutningen, d.v.s. höjden anges inte över marken utan över den nivå som uppfattas som marknivån över vindens gränsskikt. För områden med vegetation ligger denna nivå på två tredjedelar av vegetationens höjd, annars går nivån vid markytan.(Dahlström 2008) I vår analys har vi använt oss av data från 72m höjd. Skikten innehåller polygoner där varje polygon motsvarar en vindhastighet. Natura 2000-områdena kommer från Naturvårdsverket i samarbete med Metria och Länsstyrelsen och är framdigitaliserad i GIS. Skikten består av polygoner med varierande generaliseringsgrad. Data över kommunsiktet

kommer ifrån Statistiska centralbyrån (SCB) och innehåller polygoner med hög generaliseringsgrad. Dessa skikt är också inpassade i det geodetiska referenssystemet RT90 2,5 gon väst.

### 3.5.2 Uppbyggnad av modellen

Analyserna utfördes i programmet ArcGIS 9.2 som är framtaget av ESRI. Metoden byggdes upp i modellbyggaren, där olika processer och skikt sätts in med flödeskopplingar sinsemellan, så att modellen kan köras upprepade gånger (ESRI 2006).

Först valdes skikt ut i de lager som skulle studeras med structured query language (SQL). SQL är ett dataspråk uppbyggt på satser där skikt eller attribut väljs ut baserat på logiska operationer såsom AND, OR o.s.v. (Eklundh 2003). Uthus uteslöts från bebyggelseskiktet och alla järnvägar från vägskiktet, genom att välja ut de återstående segmenten i skikten. Studieområdet, Tomelilla, identifierades på liknande sätt med en SQL-sats utifrån kommunsiktet från SCB. För att kunna anpassa medlemsfunktionerna och kombinera de olika lagren med varandra konverterades lagren till rasterformat. Där cellstorleken definierades till 10\*10m. Storleken valdes med hänsyn till att cellerna skulle anpassas till medlemsfunktionerna, eftersom vissa delar av medlemsfunktionerna beskriver stora förändringar i medlemskap på korta avstånd. En cellstorlek på 1\*1 m hade genererat en alldeles för beräkningsintensiv modell. Vägar, kraftledningar och bebyggelse konverterades med en avstånds algoritm. Algoritmen skapade raster där varje cellvärde motsvarar medelavståndet till närmsta linje. Avståndet som beräknas är det euklidiska och algoritmens beräkningar grundar sig på Pythagoras sats (Distance, Calculating 2006). Natura 2000 och vattendrag konverterades på motsvarande sätt till raster. Därefter klipptes de olika avståndsrasterna med Tomelilla kommun som mall. Medelvindhastigheten innehållande vindhastighet som attribut klipptes först med Tomelillaskiktet. Därefter utfördes en konvertering från vektorformat till raster, där cellvärdena angav vindhastigheten för varje cell.

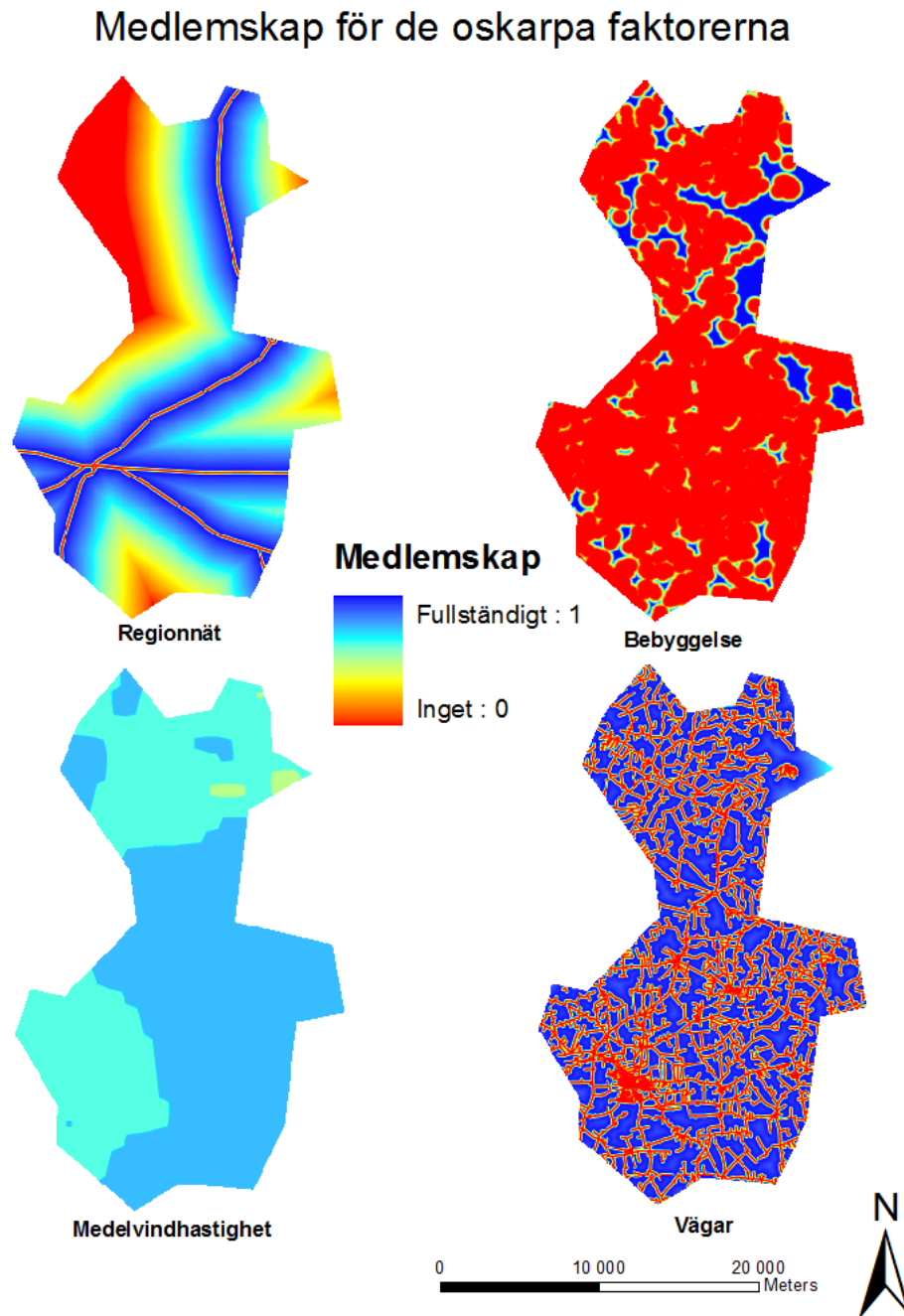
Medlemsfunktionerna och de booleska begränsningarna anpassades till faktorernas raster. Detta gjordes genom att villkoren för faktorerna definierades i rasteromräknaren i programmet. Se bilaga 1 för de skript som användes för att räkna om rasterna till värden mellan 0 och 1.

När rasterna för de oskarpa faktorerna räknats om till värden mellan 0 och 1 så överlagrades de mot varandra. Vi ville ta hänsyn till samtliga oskarpa faktorer medlemsvärde samt kunna vikta dessa mot varandra. Vid oskarp AND och OR tas endast hänsyn till den lägsta och den högsta faktorn vid bestämmandet av lämplighet. Oskarp multiplikation och algebraisk summa tar ingen hänsyn till att olika faktorer kan ha olika stor påverkan på lämpligheten. Dessutom tar de ingående oskarpa faktorerna i undersökningen hänsyn till flera olika intressen (miljö, ekonomi, levnadsmiljö), därmed valdes att varken vara risktagande eller riskundvikande. Därmed användes inte ordnat viktat medel. Metoden som valdes för att kombinera de oskarpa faktorerna blev således viktad linjär kombination. Med denna metod kunde hänsyn både tas till att olika faktorer influerar olika mycket samt att alla faktorer har en påverkan på den slutliga lämpligheten. Viktad linjär kombination är dessutom en metod som använts vid liknande undersökningar om vindkraftslokalisering (Ramirez-Rosado et al. 2007). Efter att de oskarpa faktorerna kombinerats till ett lämplighetsraster överlagrades detta med ett raster innehållande de booleska gränserna. Överlagringen gjordes genom multiplikation och resulterade i att inte godkända områden uteslöts, enligt de booleska gränserna. Resultatet blev ett raster med värden mellan 0 och 1 som beskriver lämpligheten. Se bilaga 2 för flödesschema över hela modellen.



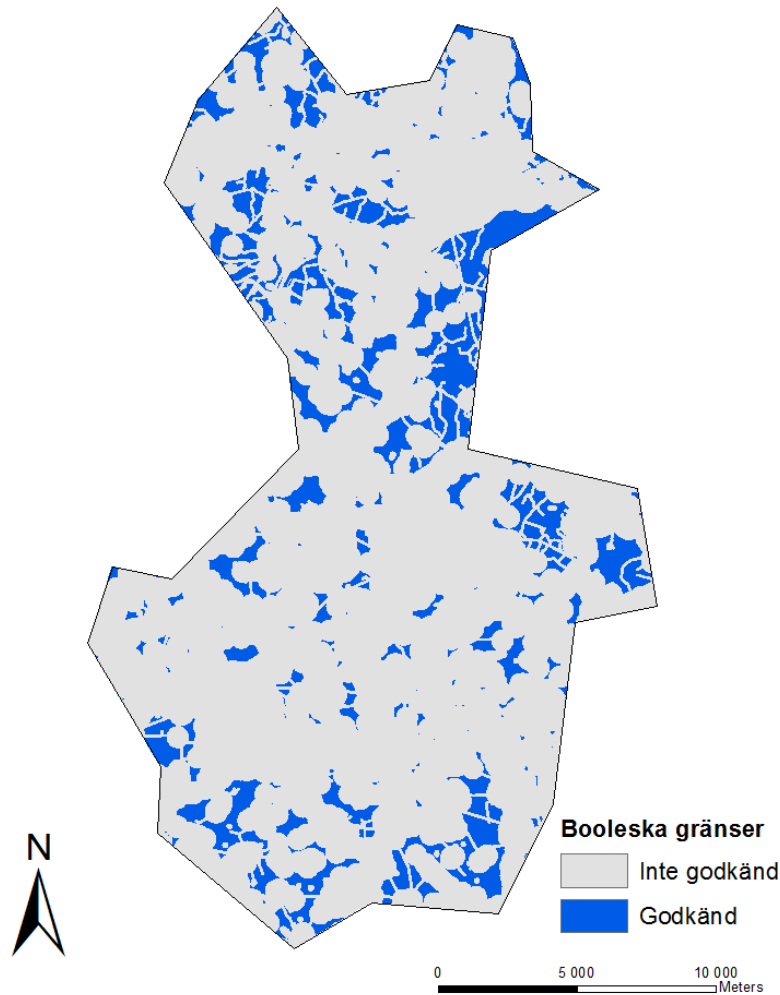
## 4. Resultat

För att utvärdera metoden utfördes visuella och numeriska utvärderingar. De oskarpa faktorernas medlemskap visualiseras var och en för sig i figur 16 och de booleska begränsningarna visualiseras i figur 17.



Figur 16. Bilden visar graden av medlemskap för de fyra oskarpa faktorerna avstånd till vägar, bebyggelse och regionnät samt medelvindhastighet. Medlemskapet bestäms av de medlemsfunktioner som tilldelats var och en av faktorerna.

## Booleska begränsningar

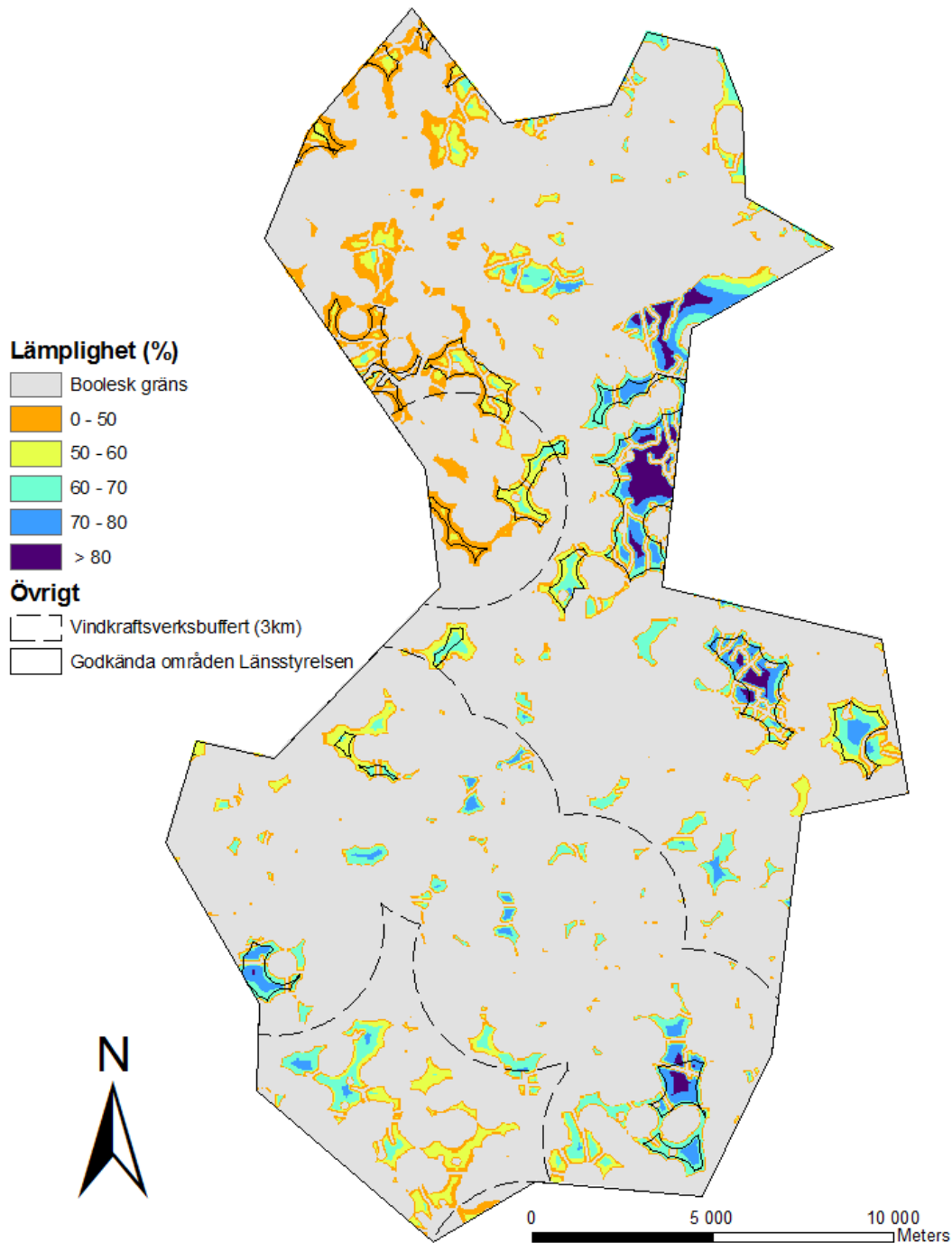


Figur 17. Figuren visar områden som täcks av booleska faktorer i analysen och därmed anses som inte godkända områden. De godkända områden är områden där graden av lämplighet bestäms av de oskarpa faktorerna.

Utifrån modellen skapades tre lämplighetskartor för Tomelilla kommun, där tre olika viktningmetoder användes. I den visuella jämförelsen används Länsstyrelsen i Skånes framtagna områden för vindkraftslokalisering (Lepic och Fagerström 2006), riksintresse för vindkraft (Riksintresse vindkraft 2008) och befintliga vindkraftverk. Länsstyrelsens lokaliseringsmetod är framtagen av ett tjugotal sakkunniga inom vindkraftsproblematik och är anpassad för Skåne län (Lepic och Fagerström 2006). Detta ansåg vi vara ett tillräckligt skäl för utvärdering mot vår modell. Angående befintliga vindkraftverk så rekommenderar Boverket, utifrån ett flertal studier, ett rekommenderat minsta avstånd till befintliga vindkraftverk/parker på 3km till 5km (Uusmann 2007). Det finns äldre vindkraftverk som skulle kunna bytas ut mot nyare (Lepic och Fagerström 2006). Därmed valdes att inte exkludera dessa områden i analysen. I analysen studerades istället de potentiella områden som ligger i konflikt med befintliga vindkraftverk. De tre lämplighetskartorna över Tomelilla kommun med länsstyrelsens gränser över godkända områden, samt en buffert om 3km kring befintliga vindkraftverk, visualiseras i figurerna 18, 19 och 20. Därutöver visualiserades hur

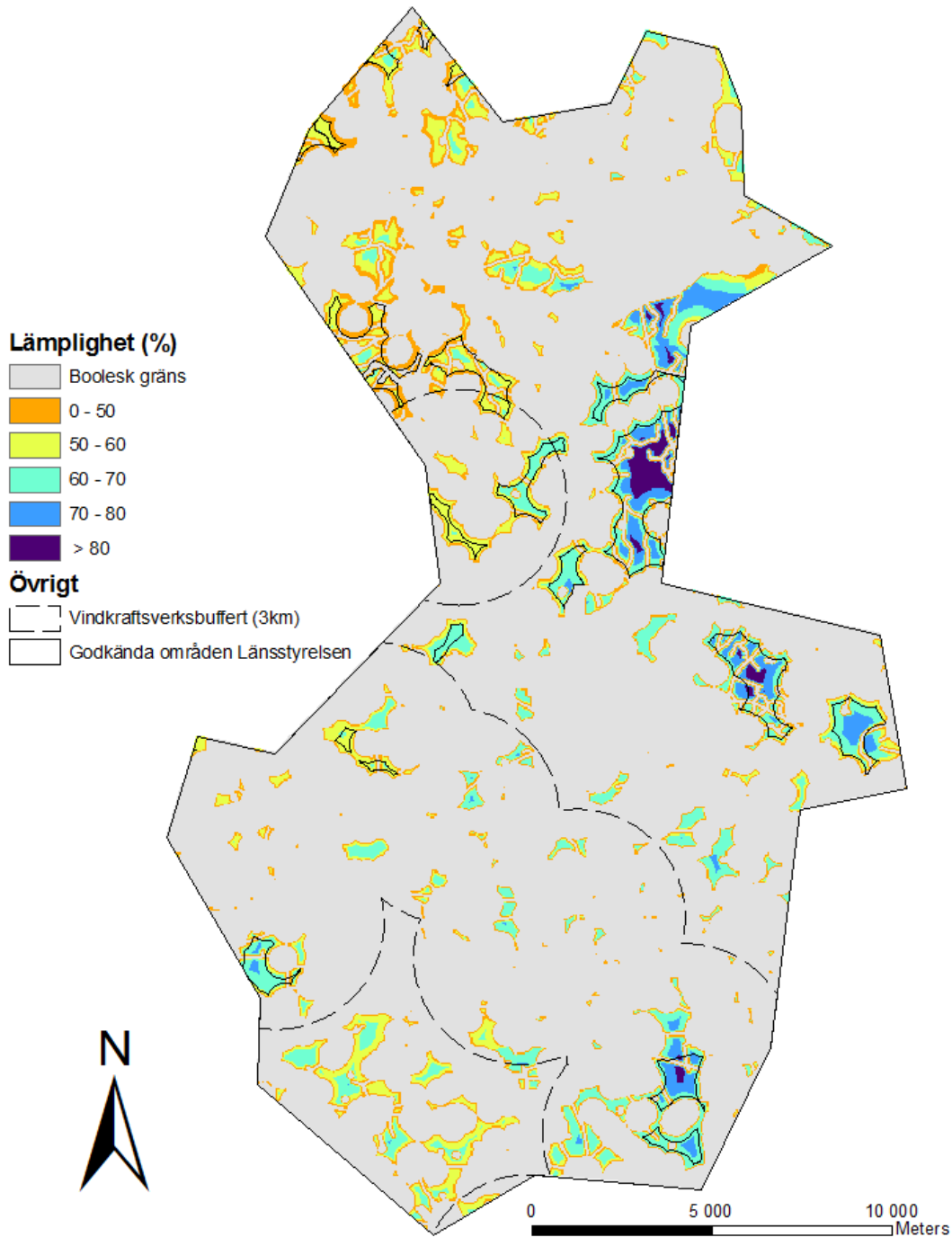
de olika lämplighetskartorna varierade i lämplighet, inom området av riksintresse för vindkraft, se figur 21.

## Lämplighet lika viktning



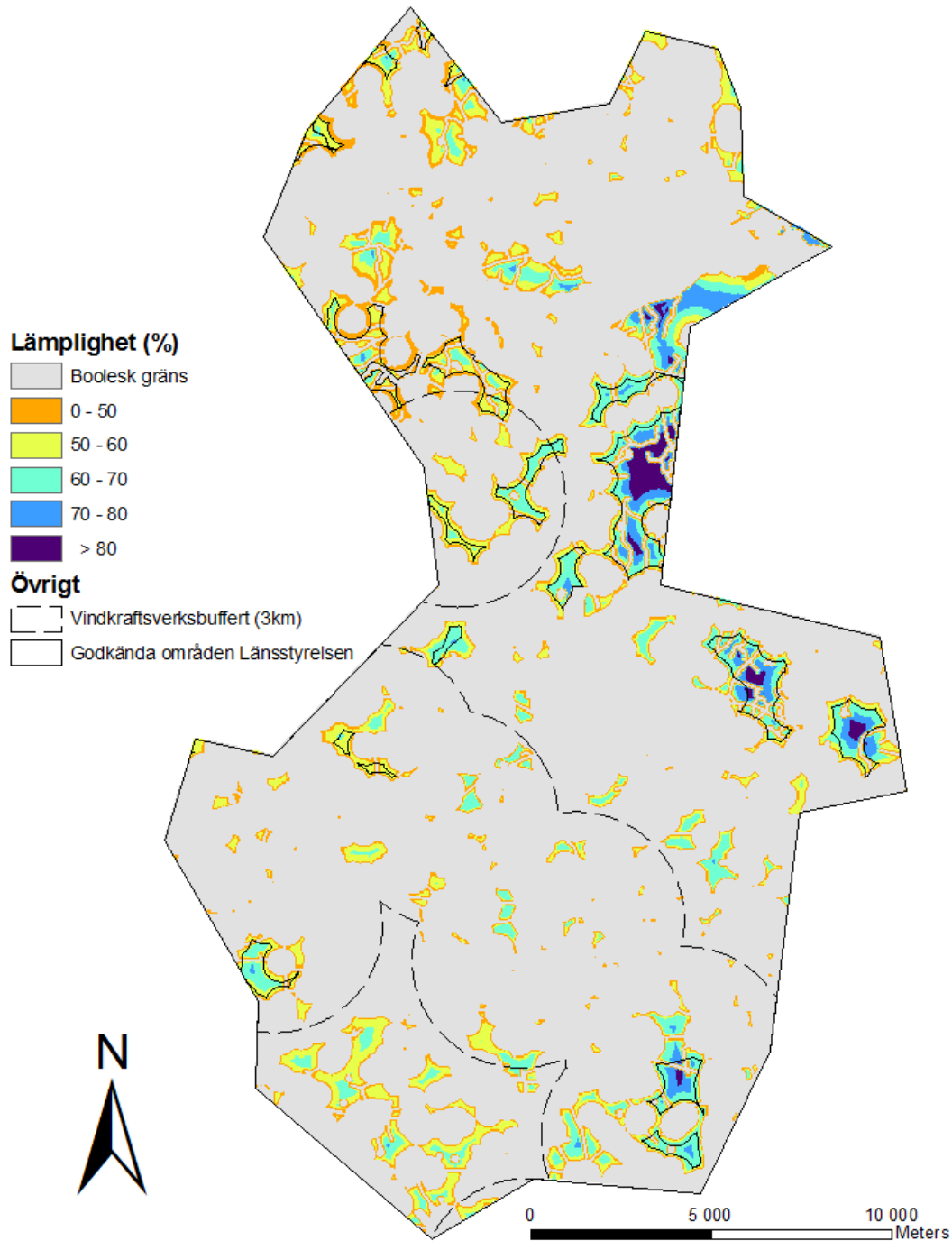
Figur 18. I figuren visas lämpligheten för anläggandet av vindkraftverk i Tomelilla kommun, baserat på lika viktning av faktorerna. Grå områden visar booleska begränsningar som inte är godkända för anläggning av vindkraft. Lämpligheten visas i fem olika färgklasser för i legenden angivna intervall. Heldragna linjer visar godkända områden av Länsstyrelsen och streckade linjer visar buffertzoner på 3000m från existerande vindkraftverk.

## Lämplighet viktning mot hela setet

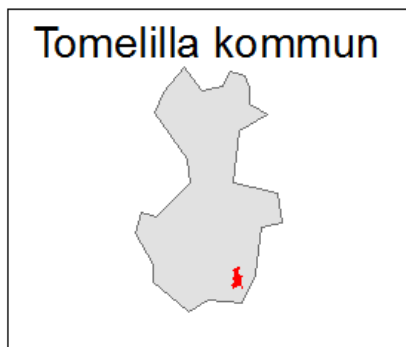


Figur 19. I figuren visas lämpligheten för anläggandet av vindkraftverk i Tomelilla kommun, baserat på viktning av faktorerna mot hela setet. Grå områden visar booleska begränsningar som inte är godkända för anläggning av vindkraft. Lämpligheten visas i fem olika färgklasser för i legenden angivna intervall. Heldragna linjer visar godkända områden av Länsstyrelsen och streckade linjer visar buffertzoner på 3000m från existerande vindkraftverk.

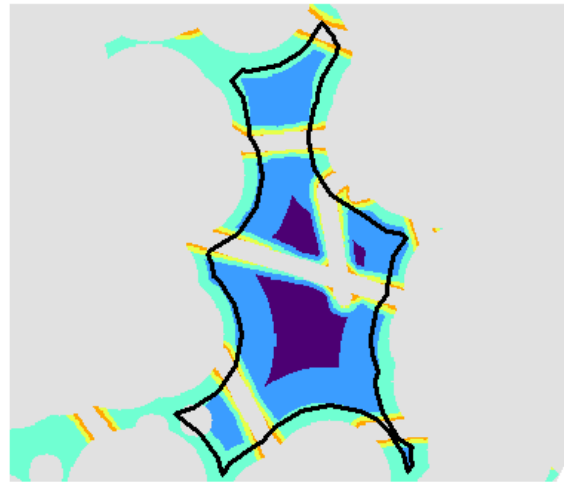
## Lämplighet parvis jämförelse



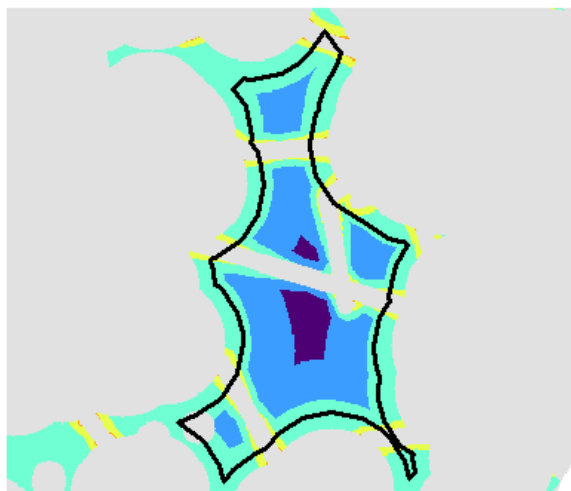
Figur 20. I figuren visas lämpligheten för anläggandet av vindkraftverk i Tomelilla kommun, baserat på parvis jämförelse mellan faktorerna för bestämning av viktning. Grå områden visar booleska begränsningar som inte är godkända för anläggning av vindkraft. Lämpligheten visas i fem olika färgklasser för i legenden angivna intervall. Heldragna linjer visar godkända områden av Länsstyrelsen och streckade linjer visar buffertzoner på 3000m från existerande vindkraftverk.



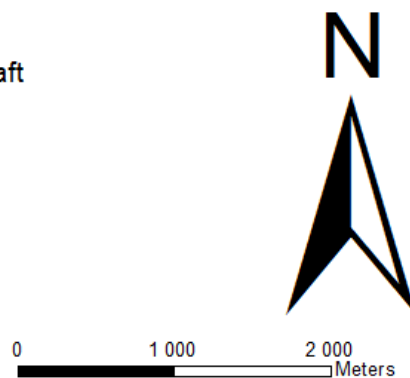
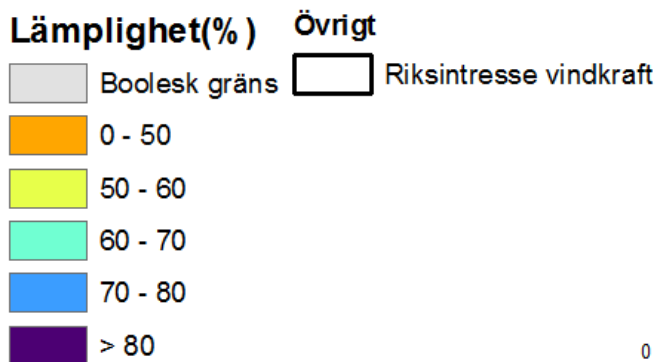
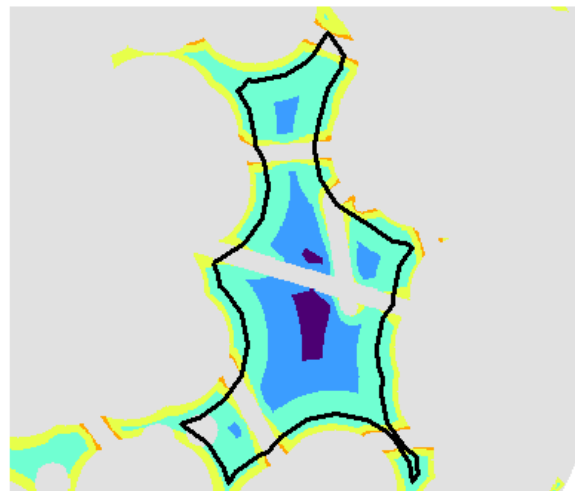
Lika viktning



Viktning mot hela setet



Parvis jämförelse



Figur 21. Figuren illustrerar den framtagna lämpligheten i vår metod för de tre använda viktningssmetoderna. Grå områden visar booleska begränsningar som inte är godkända för anläggning av vindkraft. Lämpligheten visas i fem olika färgklasser för i legenden angivna intervall. Heldragen linje visar områden av riksintresse för vindkraft.

För att kunna kvantifiera skillnaden mellan de olika viktningssmetoderna klassades de olika procentuella intervallen 0-50, 50-60, 60-70, 70-80 och > 80 om till siffrorna 5, 4, 3, 2, 1. Där klass 1 står för högst lämplighet, d.v.s. > 80 %, klass 2 för 70-80 % osv.. I övrigt uttrycker klasserna inget definitivt sätt att indela lämpligheten utan dessa klasser användes för att överskådligt kunna göra tabeller och diagram. Arean beräknades för varje klass, för de olika viktningssmetoderna, och sammanfattades i tabell 8. Areorna visualiseras i diagram 1, 2 och 3 som visar den procentuella fördelningen av lämplighetsklasserna för varje viktningssmetod.

Typ av viktning	Klass 5 (ha)	Klass 4 (ha)	Klass 3 (ha)	Klass 2 (ha)	Klass 1 (ha)
Lika viktning	1297	1660	1810	723	309
Parvis Jämförelse	672	2724	1707	499	196
Viktning mot hela setet	570	2164	2270	614	179

Tabell 8. Tabellen visar areafördelningen av de olika lämplighetsklasserna i hektar för de tre använda viktningssmetoderna.

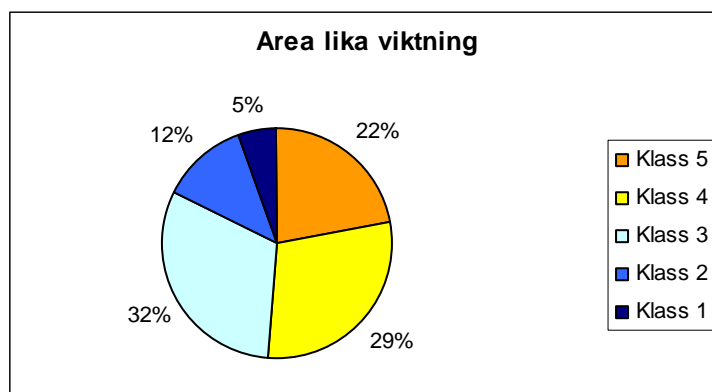


Diagram 1. Diagrammet visar procentuell fördelning för varje lämplighetsklass i Tomelilla kommun, där viktningen för varje faktor är satt till 0,25 d.v.s. lika viktning.

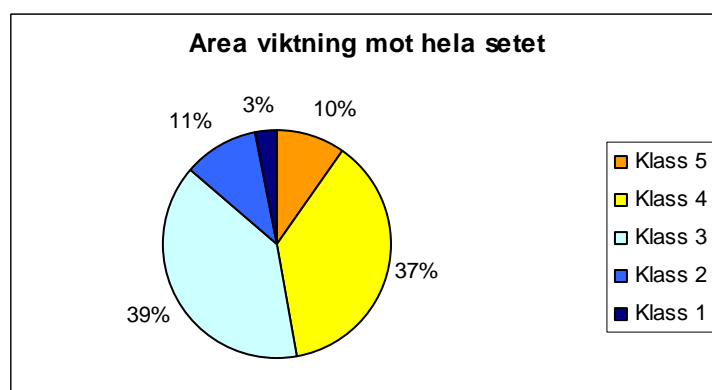


Diagram 2. Diagrammet visar procentuell fördelning för varje lämplighetsklass i Tomelilla kommun, där viktningen är bestämd genom att varje faktor viktats mot hela setet.

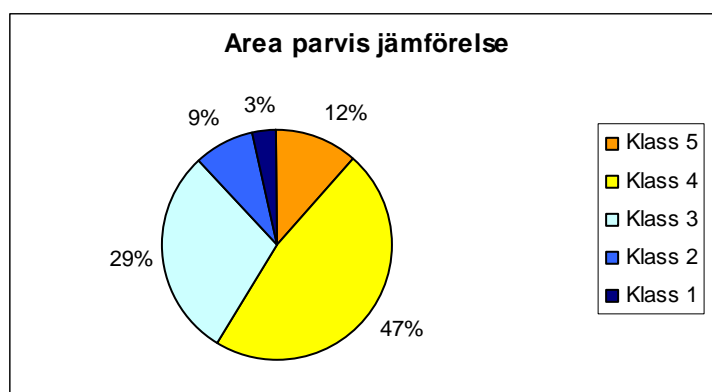


Diagram 3. Diagrammet visar procentuell fördelning för varje lämplighetsklass i Tomelilla kommun, där viktningen är bestämd genom parvis jämförelse av faktorerna mot varandra.

Utöver detta i den numeriska utvärderingen så klipptes de klassade områden med Länsstyrelsens godkända områden. Arealen beräknades för varje klass inom dessa områden och delades sedan med den totala arean för varje klass inom Tomelilla kommun. Syftet med detta var att utvärdera hur stor andel av lämplighetsklasserna för de respektive viktningsskallerna som hamnade inom länsstyrelsens godkända områden, vilket skulle kunna ge en uppfattning om vilken viktningsskall som är den lämpligaste att använda. Resultatet av denna jämförelse finns i tabell 9.

Typ av viktning	Klass 5	Klass 4	Klass 3	Klass 2	Klass 1
Lika viktning	19,9%	21,0%	21,2%	55,7%	71,3%
Parvis Jämförelse	8,5%	13,8%	41,6%	58,3%	91,7%
Viktning mot hela setet	12,9%	15,8%	28,3%	63,5%	91,4%

Tabell 9. Tabellen visar procentuell areafördelning för de olika klasserna inom Länsstyrelsens godkända områden, i förhållande till den totala arean för varje klass i Tomelilla.

## 5. Diskussion

### Resultat av analysen på Tomelilla kommun

Resultatet av modellen visar att genom att implementera oskarp logik i vindkraftslokalisering så kan man få en nyanserad bild av vilka områden som är lämpade för anläggning av vindkraftverk. Baserat på olika sätt att vikta de oskarpa faktorerna så skiljer sig de olika klassernas areafördelning. Jämfört mot utvärderingsdata från Länsstyrelsen täcker de frammodellerade lämplighetsområdena in en stor del av områdena som ansågs var godkända, men även områden som inte ansågs var godkända. Detta beror på att vi i vår undersökning utgått från andra gränsvärden för lämplighet än Länsstyrelsen samt att Länsstyrelsen utgått ifrån fler faktorer. En annan skillnad är att Länsstyrelsens metod bygger på boolesk- och vår på oskarp logik. En boolesk faktor kan endast anta 0 eller 100 % i lämplighet, medan en oskarp faktor påverkar lämpligheten beroende på sin viktning och sitt medlemskap. Det räcker med att någon av de oskarpa faktorerna bidrar med något i lämplighet för att området ska få ett lämplighetsvärde. Inom områden godkända av länsstyrelsen skapar modellen en graderad skillnad i lämplighet. Huvuddelen av dessa områden har en lämplighet >60 %. Men även vissa delar av områdena klassas in i en låg lämplighetsklass eller som booleska gränser. Detta beror främst på att Länsstyrelsens analys inte tar hänsyn till avstånd från kraftnät och vägar, varken ur säkerhets- eller ekonomisk synpunkt. Detta kom vi fram till var viktiga faktorer.



Figur 16 beskriver det rumsliga medlemskapet, i Tomelilla kommun, för de fyra oskarpa faktorerna. Det finns ett fåtal regionledningarna som går genom området. Detta resulterar i stråk av högre medlemskap som går genom området, med en zon av lågt medlemskap intill ledningarna. Områden med mycket lågt medlemskap för avstånd till regionnät finns där det är långt till regionnätet, exempelvis i nordöstra delen. Medelvindhastigheten har ganska små variationer i medlemskap, från 0,5 – 0,75, i Tomelilla kommun, men den är högt viktad för samtliga tre viktningmetoder. Detta gör att lämpligheten för de olika områdena varierar någorlunda mycket, trots små variationer i medlemskap. Vägarna är i stort sett jämnt fördelade över området och har därför ungefär samma mönster för medlemskap över hela området. Undantaget är tätort där vägarna ligger tätare. Medlemskap för avstånd till bebyggelse visar ganska lågt medlemskap över stora delar av kartan, med fläckvis högre medlemskap.

De booleska faktorer som vi tagits med i vår analys resulterade i figur 17, som visar godkända och inte godkända områden. Den faktor som orsakar störst områden som inte är godkända är bufferten på 400m kring bebyggelse. Även säkerhetszonen på 50m kring vägar har stor inverkan.

Visuellt påminner lämplighetskartorna i figurerna 18, 19, och 20 mycket om varandra. Arean beräknades därför för de olika klasserna inom Tomelilla för varje viktningmetod, se tabell 8. Som väntat gav olika viktningar olika areafördelning för de olika klasserna. Trots att skillnaderna i viktning inte är så stora mellan parvis jämförelse och viktning mot hela setet, blir skillnaden i areafördelningen för de olika klasserna relativt stor. Detta tror vi beror på att skillnaden i viktning främst ligger i avstånd till bebyggelse och avstånd till regionnät. Bebyggelsen har stor geografisk utbredning och en medlemsfunktion som ändrar lämplighet på relativt kort avstånd (600m). Detta leder till att en liten ändring i viktning kan leda till stora förändringar av lämpligheten. Det finns en tendens i lämplighetskartorna i figurerna 18, 19 och 20 att de östra områdena, som inte begränsas av booleska gränser, har hög lämplighet. Anledning till detta är att vindhastighet och avstånd till regionnät bidrar till en hög lämplighet, vilket kan ses i figur 16. I figur 18, då lika viktning för de ingående faktorerna använts, är lämpligheten högre i nordost än för de övriga två viktningmetoderna. Detta beror till stor del på att vinden har viktats lägre och avstånd till regionnät högre i denna metod. Däremot har det nordvästra området sämre lämplighet vid lika viktning, än övriga viktningar, eftersom avståndet till regionnätet är stort och denna faktor viktas mycket högre i denna metod än i de övriga. Den stora skillnaden mellan parvis jämförelse och viktning mot hela setet för områden i klass 1, d.v.s. lämplighet >80 %, är ett område i mellersta delen av Tomelilla. Då parvis jämförelse använts är lämpligheten >80 % i detta område och 70-80 % vid viktning mot hela setet. Detta beror främst på att avstånd till bebyggelse viktas högre för parvis jämförelse.

Utifrån tabell 9 kan man konstatera att det finns en trend för de tre viktningmetoderna. Trenden visar att klasser med högre lämplighet tenderar att hamna inom godkända områden från länsstyrelsen. I klass 2 hamnar över 55 % av arean för klassen inom godkända områden av länsstyrelsen, för samtliga viktningmetoder. Vidare ser man att över 91 % av den totala arean för klass 1 hamnar inom godkända områden, för parvis jämförelse och viktning mot hela setet. För lika viktning av faktorerna är denna siffra 71 %. Dessutom finns en större andel av de låga lämplighetsvärdena i klass 4 och 5, då lika viktning använts, än de övriga två viktningmetoderna. Detta indikerar att viktningmetoden för lika viktning är den metod som genererar sämst områden av de tre, då vi utvärderar mot Länsstyrelsens godkända områden.

Eftersom modellen tar fram en översiktlig bild över vilka områden som är lämpliga för vindkraftlokalisering. Behövs ytterligare analys för att bestämma mer exakt var det skulle

vara lämpligt att placera vindkraftverk. Det är svårt att veta var denna gräns i lämplighet skall dras, eftersom olika intressenter kan ha olika typer av krav. Ett sätt att generellt kunna sätta en sådan gräns hade varit att använda tabell 9 och utvärdera mot länsstyrelsens godkända områden. I klass 2 hamnar över 50 % av arean för klassen inom länsstyrelsens godkända områden, för samtliga tre viktningmetoder. Baserat på detta skulle man kunna sätta gränsen för områden som är lämpliga för vidare analys vid 70 %.

Boverket (Uusmann 2007) rekommenderar att det inte anläggs nya vindkraftverk närmare än 3km från redan existerande. Inom dessa områden som visualiseras som buffertar på 3km i figur 18, 19 och 20, finns endast ett större område med lämplighet över 80 % och få små områden med lämplighet över 70 %. Majoriteten av områden med lämplighet över 80 % ligger i vår modell utanför buffertområdena, vilket gör att dessa områden är lämpliga för vidare analys. Eftersom vindkraftverken som redan är byggda kan vara gamla och därför utbytbara, kan det ändå vara motiverat att undersöka områden som ligger innanför bufferten. När vi undersökte om vindkraftverken låg inom de framtagna lämplighetsområdena, såg vi att majoriteten av vindkraftverken fanns i inte godkända områden. Detta var p.g.a. att de befann sig för nära vägar. Vägarna som de angränsade till verkade antingen vara byggda till vindkraftverken eller var av typen sämre bilväg. För att förbättra vår metod kunde vi undersökt ytterligare om sämre bilväg skulle valts bort från vägskiktet.

Området som Energimyndigheten tagit fram som riksintresse passar bra in för alla tre viktningmetoder i lämplighetsintervall  $> 60\%$ , med större delen av områdena i de höga lämplighetsintervallen  $> 70\%$  se figur 21. Modellen genererar dock inte ett sammanhängande lämpligt område för anläggning av vindkraftverk, till skillnad från riksintresse för vindkraft. Vägarna som skär av området skapar booleska barriärer, vilket är en faktor som inte tagits med av Energimyndigheten. Lämpligheten är hög inom området för samtliga viktningmetoder. Den viktningmetod som genererar områden med högst lämplighet är den som använder lika viktning, både i intervallet  $70 - 80\%$  och i intervallet  $> 80\%$ . Viktningmetoden som använder en parvis jämförelse skapar minst områden i samma lämplighetsintervall. Detta är till motsats från de resultat som vi fick när vi utvärderade mot Länsstyrelsens områden, då metoden för parvis jämförelse fick bäst passning i de höga lämplighetsklasserna. Emellertid är metodiken för skapandet av områden för riksintresse anpassad för hela Sverige och väldigt generell. Vi utvärderar dessutom mot ett litet område i Tomelilla kommun, vilket gör att vi inte rättvist kan utvärdera modellen mot riksintresset.

### **Område som modellen är anpassad för**

Syftet med undersökningen var att ta fram en oskarpmodell för vindkraftslokalisering i ett översiktligt planeringsskede. Med hänseende på vilka faktorer som har tagits med i modellen anser vi att den inte lämpar sig för att användas på områden med lägre skala än kommunnivå. Om man kommer ner på lägre skala måste man börja ta hänsyn till ytterligare faktorer, t.ex. turbulens. I modell användes data med upplösningen  $1*1$  km, inom detta område kan vindhastigheten variera bl.a. beroende på turbulens. Derickson (2004) skriver i sin rapport att turbulens kan påverka negativt genom att vindturbiner skadas samt påverka så att energiutvinningen inte blir optimal. För att användas på lägre skala behöver vinddata därför vara mer detaljerad. Övrig data som använts i modellen är relativt detaljerad, 1:10000, vilket gör att modellen inte heller är lämpad att användas på för hög skala som hela Sverige. Baserat på detta anser vi att vår modell är lämplig att använda på områden i storleksområde mellan kommun- och länsnivå. För att användas på högre skala skulle data som används kunna vara mindre detaljerad och kompletteringar av faktorer göras såsom, avstånd till havet, flygplatser m.fl.

## **Faktorer**

Valet av vilka faktorer som är viktiga att ta med i oskarp logik är subjektiva. Men det finns vissa faktorer som är mer självklara än andra t.ex. vindhastighet. För att få fram vilka faktorer som skall användas vid oskarp lokalisering av vindkraftverk, krävs omfattande undersökningar. Vi utgick ifrån ett flertal rapporter och artiklar samt sakkunniga, då vi valde ut faktorerna. Gemensamt för Länsstyrelsen, Energimyndigheten och Boverket är att vinden är en förutsättning. Likaså måste hänsyn tas till de människorna som bor där, vilket gör att avstånd till bebyggelse också är en viktig faktor. Avstånd till kraftnät och vägar identifieras som viktigt av Boverket i samråd med övriga myndigheter (Uusmann 2007). Detta görs ur miljösynpunkt eftersom minimal påverkan på landskapet eftersträvas. Men även ur ekonomisk synpunkt för att minimera anslutningskostnaderna. Dessa faktorer ansågs dessutom rimliga som viktiga faktorer i ett översiktligt planeringskede av sakkunnig Pavel Sensky.

Vilka geografiska områden och vilken skala man använder påverkar viktningen och till viss del vilka faktorer som ska användas. Modell är framförallt framtagen för ett landskap som inte är så kuperat. I ett kuperat landskap kan t.ex. sluttning få stor inverkan. Sluttning kan fungera som en begränsande faktor genom att det inte går att anlägga vindkraftverk i för hög sluttning. Enligt Ehrenrich et al. (2005) finns en begränsning på 15-20 graders sluttning p.g.a. turbulens och transport vid anläggandet. Sluttningen skulle också kunna fungera som en oskarp faktor då den påverkar kostnaden för anläggningsarbetet. Hänsyn till kostnadspåverkan från sluttning skulle också kunna tas med genom att man tar med den i viktningen av avstånd till vägar och regionnät. På grund av att det bildas turbulens över vegetation skulle skogsområden kunna tas med som en faktor. Skog skulle kunna vara en oskarp faktor beroende på hur hög vegetationen är och hur utsträckt den är. För områden som ligger vid kusten skulle avstånd från havet kunna användas som en faktor. Hansen (2005) har i sin undersökning av lämplig lokalisering av vindkraftverk, med hjälp av oskarp logik, använt sig av avstånd till kusten som en oskarp faktor. Kustområden skyddas enligt svenska lag i miljöbalken 4 kap 2§ och 4§. Länsstyrelsen i Skåne län rekommenderar att det inte anläggs vindkraftverk inom 3500m från flygplatser utan styrsystem och 6000m från flygplatser med styrsystem (Uusmann 2007). Tomelilla hade en flygplats men eftersom passagerartrafik saknades och flygplatsen var liten, valdes att inte ta med den i modellen. Detta resonemang stärktes ytterligare genom att det redan fanns ett vindkraftverk på 700m från flygplatsen. Troligtvis kommer inte tillstånd ges att anlägga nya vindkraftverk precis intill flygplatsen. Men vi ansåg att hänsyn till detta kunde tas i en mer detaljerad undersökning, än vår översiktliga. Kultur- och naturskyddsområden är två andra faktorer som skulle vara intressanta att ta med i analysen som oskarpa faktorer, eftersom dessa oftast inte är direkt begränsande.

För att anpassa metoden för en lägre skala skulle man kunna ta hänsyn till ytterligare faktorer som vindriktning, markegenskaper, försvarsmaktens områden m.fl.. Data som använts skulle också behöva vara mer detaljerad, t.ex. skulle vindhastigheten behöva mätas på de platser man anser lämpliga istället för att modelleras, så att hänsyn tas till lokala förhållanden som turbulens.

## **Medlemsfunktioner**

Linjära medlemsfunktioner sattes till samtliga oskarpa faktorer. Huruvida detta är rätt eller inte är väldigt subjektivt. Vindhastigheten är en faktor som hade kunnat beskrivas med en annan typ av medlemsfunktion. Eftersom effekten ökar kubiskt med ökad vindhastighet (Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007) hade möjligtvis en j-formad (dvs. exponentiell) medlemsfunktion kunnat användas. I praktiken är det emellertid snarare ett kvadratisk

samband mellan vindhastighet och vindeffekten p.g.a. att vindkraftverket bara är igång under vissa rådande vindförhållande (Bygga och ansluta större vindkraftverk 2007). Med det i åtanke så hade möjligheten för en vidare analys kunnat vara att anpassa en medlemsfunktion som uppvisar kvadratiska egenskaper t.ex. en sigmodial. Vinddata från MIUU-modellen är medelvärdesbildat på stora områden på 1\*1 km. En kvadratisk medlemsfunktion såsom den sigmodiala, kan generera icke representativa värden p.g.a. att medelvindhastigheten kan variera inom området. Om t.ex. medelvärdet är 5 m/s så finns en möjlighet att den faktiska vindhastigheten i området både är högre och lägre, t.ex. 4,5 m/s och 5,5 m/s. Vid beräkning av effekten skulle kvadraten av dessa tal skilja sig ganska mycket från varandra. Med tanke på detta är nog en linjär medlemsfunktion mer lämplig för att hantera så grovupplöst data. Den linjära medlemsfunktionen har dessutom styrkan att den är lätt att förstå, vilket är god egenskap i en beslutsprocess enligt Saaty (1990). Mer studier hade behövts inom området för att besluta om vilken medlemsfunktion som bäst beskriver medelvindhastigheten. Vidare kan det diskuteras hur bra det är att använda Energimyndighetens och SWECO Positions booleska gräns på 6,5 m/s som tröskelvärde. Eftersom vi satte 8,5 m/s som maxvärde fick det till följd att gränsen för inget medlemskap blev 4,5 m/s, vilket är ganska lågt. Men om tröskelvärdet satts högre t.ex. 7,5 m/s hade områden med medelvindhastighet lägre än 6,5 m/s bedömts olämpliga. Länsstyrelsen (Lepic och Fagerström 2006) anser att det blåser tillräckligt bra i hela Skåne för vindkraftslokalisering. I vinddata fanns det områden i Skåne med medelvindhastighet på 6 m/s. Det är svårt att avgöra något definitivt, men utifrån länsstyrelsen och rekommendationer för hur man ska sätta upp en medlemsfunktion (Burrough & McDonnell 1998) så bör valet av tröskelvärde vara bra.

Ökningen i kostnad, beroende på avstånd till vägar och regionnät, generaliserades till en linjärt avtagande lönsamhet. Detta symboliserades med linjärt avtagande medlemsfunktioner. I en studie gjord av Eastman (1995) användes samma typ av linjära förhållanden för att beskriva kostnaden, utifrån detta anser vi att medlemsfunktionerna är lämpliga. Det är svårt att bedöma avståndet för när det inte längre är lönsamt att bygga vindkraftverk, p.g.a. att det till stor del är beroende på hur många verk som ämnas byggas. Tröskelvärdet vi använde på 3000m har tidigare använts som boolesk gräns av SWECO. För att ta hänsyn till olika storlekar av parker så hade flera olika medlemsfunktioner, för de oskarpa faktorerna, behövt skapats. Detta skulle bli en väldigt tidsödande process och därmed kan det vara bättre att generalisera det till en medlemsfunktion. Medlemsfunktionerna symboliserar även säkerhetsaspekten att anlägga nära regionnät och vägar. Hansen (2005) använde sig av en linjär medlemsfunktion för att beskriva säkerhetsavståndet från vägar. Detta borde därför även gälla för avstånd till regionnät ur säkerhetssynpunkt. Huruvida säkerhetsgränserna som vi definierat är tillämpliga i verkligheten, med alla tillståndsprocesser som krävs, för att bygga vindkraftverk är komplicerat att veta. Men då vi utgått från myndigheter och statliga verk anser vi gränserna vara tillräckliga. Om möjligt hade gränsen på 120m för vägar kunnat justeras till ett ännu större avstånd, för att öka säkerheten.

När medlemsfunktionerna för avstånd till bebyggelse skapades, användes inte ett definierat tröskelvärde, som vid de andra medlemsfunktionerna. Gränserna anpassade vi istället från rekommendationer från statliga verk och myndigheter. Den nedre gränsen på 400m satte vi som tidigare nämnt med hänsyn till ett fall ur miljööverdomstolen (Vindkraft på land 2006). I en annan dom av miljööverdomstolen (Vindkraft på land 2006) ska prövningar ske från fall till fall. Prövning ska tas med hänsyn till hur mycket vindkraftverket låter och inte på vilket avstånd vindkraftverket ska byggas. Metoden är emellertid så pass generell att den syftar till att ge en översiktlig planeringslokalisering. Detta gör att det inte går att ta hänsyn till sådana störningsmoment.

### **Kombinationsmetod/viktning**

Viktad linjär kombination var den metod som användes vid kombination av faktorerna. Metoden har använts vid flera andra flerfaktorsanalyser (Eastman et al 1995; Ramirez-Rosado et al. 2007; Rousis et al 2008; Hansen 2005). Enligt Voogd (1983) är det den metod som används oftast inom flerfaktorsanalys. Svårigheten med viktad linjär kombination ligger i att bestämma vikterna som faktorerna ska multipliceras med. Parvis jämförelse är en väl utarbetad teknik för att ta fram dessa vikter. Metoden är allmänt accepterad för att skapa viktningstabeller (Eastman 2006). Problemet med viktningen i vår metod var att endast ett fåtal referenspersoner konsulterades i framtagandet av viktningarna. I andra flerfaktorstudier har det rådgjorts med ett flertal personer i framtagandet av viktningarna (Ramirez-Rosado et al. 2007; Rousis et al. 2008). Eftersom metoden endast använder fyra oskarpa faktorer, är det förmodligen mer intuitivt att vikta mot hela setet, än att använda en parvis jämförelse. Styrkan med parvis jämförelse ligger i att det är lättare att jämföra två faktorer i taget, än att jämföra mot hela setet, då ett stort antal faktorer används. I en fortsatt utveckling av metoden hade det varit intressant att kontakta fler personer, med olika expertisområden, för att skapa en mer robust viktningstabell. Emellertid så var tanken med modellen att viktningen skulle kunna justeras i efterhand, av beslutsfattare och intressenter.

### **Dataosäkerhet**

Data som har störst osäkerhet är vindhastighet. Denna är framtagen av en numerisk modell och har en grov upplösning. Skikten från länsstyrelsen dvs. byggnader, vägar, regionnät och vattendrag har ett medelfel p.g.a. fel i positionering mätt i mm. Dessa fel kan uppgå till 10m. I analysen genomfördes en konvertering från vektor- till rasterdata, vilket kan innebära att noggrannheten minskat något. Eftersom en rasterstorlek på 10\*10 m användes, bör denna osäkerhet inte vara särskilt stor.

### **Datamodellen**

Tanken med modellen var att göra metoden upprepbar. ArcGis modelbuilder har färdiga verktyg för att göra en analys av detta slag. Det är relativt enkelt att lära sig modellbyggaren om man har kunskaper inom GIS. De flesta tekniska problem som uppstår går att lösa. Nackdelen med vår datamodell är att resultatet måste bearbetas för att visualisera kartorna enligt god kartografisk sed. Den konceptuella modellen för metoden hade kunnat tillämpas i andra GIS program.

### **Ytterligare förbättringar**

Inom vindkraftslokalisering kan det finnas intressen som går i konflikt med varandra, t.ex. miljö och ekonomi. Ett sätt att utveckla vår metod ytterligare skulle vara att ta hänsyn till dessa intressen. Detta hade kunna göras genom att en metod baserad på analytisk hierarkisk process (AHP) tagits fram. AHP är en metod som tagits fram av Saaty (1980), i vilken en hierarkiskstruktur byggs kring vilka intressen som finns. Varje intresse tilldelas faktorer som ges olika viktningar var för sig och intressena vägs sedan samman. Resultatet blir en lämplighet där hänsyn tas till samtliga intressen och faktorer. Det kan t.ex. vara att marken som är lämplig för vindkraftslokalisering också är lämplig för andra ändamål t.ex. jordbruk. Problemet går att lösa genom att man precis som vid intressen i konflikt, viktat de olika ändamålen mot varandra (Eastman 1995).

### **Metodens gångbarhet**

Metoden som vi tagit fram ger en kontinuerlig återgivning av lämpligheten för lokalisering av vindkraftverk. I vår analys tillämpade vi vår modell på Tomelilla kommun. Vi anpassade vår

metod främst för flacka landskap, men genom att komplettera de ingående faktorerna hade modellen kunnat vara tillämpbar i hela Sverige. Eftersom vår metod ger en kontinuerlig lämplighet hade områden med särskilt hög lämplighet kunna lokaliseras redan i det översiktliga planeringsstadiet. På så sätt hade den påföljande mer detaljerade undersökningen för att hitta platser för att bygga vindkraftverk kunnat underlättas. Detta innebär att hela lokaliseringsprocessen med beslut och prövningar skulle kunna påskyndas. För att tillämpa metoden i praktiken bör fler sakkunniga ingå i framtagandet. Dessutom hade en validering av metoden behövt göras. Valideringen hade kunnat genomföras genom att statistiskt testa viktningen och göra stickprov i fält på områden med hög lämplighet. Sverige står inför en stor utbyggnad av vindkraftverk varför en framtagandet av en bra metod att lokalisera vindkraftverk är av stor vikt.

## 6. Slutsatser

- Vindkraftlokaliseringsproblematik är en komplex vetenskap, varför det alltid kommer att ske en subjektiv bedömning av vilka faktorer som är viktiga och hur viktiga de är.
- Oskarp logik ger en mer nyanserad bild över lämpliga områden att lokalisera vindkraftverk än om boolesk logik används.
- Oskarp logik kan göras väldigt komplex genom att hänsyn tas till olika faktorer, viktning, intressen och risktagande. På så sätt finns goda möjligheter att återspegla de verkliga förutsättningarna. Trots detta är det bara en modell vilken inte kan återspegla verkligheten till fullo.
- Med tämligen enkla dataverktyg går det att skapa en modell baserad på oskarp logik för lokalisering av vindkraftverk.
- För att få fram en metod som bättre återskapar verkligheten behöver fler personer konsulteras i viktningens framtagningen och fler faktorer behöver implementeras. Faktorer som hade varit intressanta för vidare analys är t.ex. topografi och markanvändning.

## 7. Referenser

### Artiklar

Burrough P.A. (1989), *Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation*, Journal of Soil Science, Vol 40, s. 477-492

Carver Stephen J. (1991), Intergrating multi-criteria evaluation with geographical information systems, Int. J. Geographical Information Systems, Vol. 5, Nr 3, s. 321-339

Eastman J. Ronald et al. (1995), *Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 61, Nr. 5, s. 539-547

Eastman J. Ronald & Hong Jiang (2000), *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 14, Nr. 2, s. 173-184

McBratney Alex. B. & Odeh Inakwu O.A. (1997), *Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic measurements and fuzzy decisions*, Geoderma, Vol. 77, s. 85-113

Ramirez-Rosado Ignacio J. et al. (2007) *Promotion of new wind farms based on a decision support system*, Renewable Energy, Vol. 33, s. 558-556

Rousis K. et al. (2008) *Multi-criteria analysis for the determination of the best Waste Management scenario in Cyprus*. Acceperad den 4 dec 2007. Hämtad från: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Hämtad den: 5 maj 2008

Saaty Thomas L and Vargas Luis G. (1987), *Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process*, European Journal of Operational Research, Vol 32, s. 107-117

Saaty Thomas L. (1990), *How To Make A Decision:The Analytic Hierarchy Process*, European Journal of Operational Research, Vol 48, Nr 1, s. 9-26

Söderholm et al. (2007) *Wind power development in Sweden: Global policies and local obstacles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 11, s 365-400

Tsung-Yu Chou et al. (2008), *A fuzzy multi-criteria model for international tourist hotels location selection*, International Journal of Hospitality Management, Nr 27, s. 293-301

Yager Ronald R. (1988), *On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking*, IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, Vol. 18, No 1

Zadeh L. A. (1965), *Fuzzy Sets*, Information and Control, Vol. 8, s. 338-353

### Uppsatser/Avhandlingar

Bergström Hans (2007), *Vindpotentialen i Sverige på 1-km skala: Beräkningar med MIUU-modellen*, Institutionen för geovetenskaper, luft och vattenlära, Uppsala universitet

Hansen Henning S. (2005), *GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development*, National Environmental Research Institute, Aalborg Universitet

Pedersen Eje & Persson Wayne Kerstin (2002), *Störningar från vindkraft:undersökning av människor boende i närhet av vindkraftverk: Slutrapport Del 3 Huvudsyfte*, Avdelnings för miljömedicin, Göteborgs universitet

Schubert Per (2004), *Cultivation Potential in Hambantota District, Sri Lanka*, Examensarbete, Institutionen för naturvetenskap och ekosystemanalys, Lunds universitet

### Rapporter

Blomqvist Peter et al. (2008), *Vindkraft i framtiden möjlig utveckling i Sverige till 2020*, Elforsk rapport 08:17, Hämtat från: [www.vindenergi.org](http://www.vindenergi.org) Hämtat den: 22 maj 2008

Derickson Russel G. et al. (2004), *Resolving Difficult of Wind Power Micrositing in Complex Terrain*, AWEA Global WINDPOWER 2004 Conference, Mars 28-31, Chicago Illinois

Energimyndigheten (2007), *Vindkraft - Bygga och ansluta större vindkraftverk*, Hämtad från [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se), Hämtad den 29 april 2008

Red. Ehrenreich M. et al. (2005), *GIS Analyses Aineck and Brenner, Austria and Italy: Documentation of GIS Concepts, Methods and Results*, Alpine Wind harvest report series, Rapport nr 7-4

Kristianstad kommun (2007), *Vindbruksplan för Kristianstads kommun*, Hämtad från [www.kristianstad.se](http://www.kristianstad.se), Hämtad den 29 april 2008

Lepic John och Fagerström Göran (2006), Länsstyrelsen i Skåne Län, *Planeringsunderlag för utbyggnad av stora vindkraftsanläggningar på land*

Naturvårdsverket (2002), *Våra stränder och bestämmelser om strandskydd*, Hämtat från [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se), Hämtad den 15 maj 2008

Naturvårdsverket (2006), *Vindkraft på land*, Hämtad från [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se), Hämtad den 29 april 2008

Tennberg Klas och Bjursell Sara (2007), Energimyndigheten, *Nytt planeringsmål för vindkraften år 2020*, Hämtad från [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se), Hämtad den 29 april 2008

Uusmann Ines (2007), Boverket, *Planering och provning av vindkraftsanläggningar*, Hämtad från [www.boverket.se](http://www.boverket.se), Hämtad den 26 april 2008

### **Böcker**

Burrough Peter A. & McDonnen Rachael A (1998), *Principles of Geographical Information systems*, Oxford University Press, Oxford

Red. Eklundh Lars (2003), *Geografisk informationbehandling*, Gävle Offset AB, Stockholm

Saaty Thomas L. (1980), *The Analytical Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York

Voogd H (1983), *Multicriteria Evaluation for Urban and regional planning*, Pion, Ltd., London

Wizelius Tore (2003), *Vindkraft i teori och praktik*, Studentlitteratur AB

### **Elektroniska källor**

Dahlström Fredrik, Hämtad från [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se), Hämtad den 25 april 2008

Energimyndigheten, Sökord: *Riksintresse vindkraft*, Hämtad från [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se), Hämtad den 14 maj 2008

Naturvårdsverket, Sökord: *Verksamheter-med-miljöpaverkan/Energi/Vindkraft*, Hämtad från [www.naturvardverket.se](http://www.naturvardverket.se), Hämtad den 10 april 2008

### **Muntlig kommunikation**

Sensky Pavel, SWECO VIAK, Senior Consult, maj 2008

Sigfrid Johan, SWECO POSITION, Gruppchef region syd, maj 2008

### **Övriga**

Clark labs (2006), IDRISI Help, Sökord: *WEIGHT*, IDRISI The Andes version 15th edition



Eastman J. Ronald (2006), Clark labs, *IDRISI Manual*, IDRISI The Andes version 15th edition

ESRI Inc (2006), ArcMap Help, Sökord: *DISTANCE*, *CALCULATING*, ArcGIS version 9.2

Svensk författningssamling, *Miljöbalk (1998:808)*, Ändring införd: t.o.m. SFS 2007:661

## Bilaga 1. Skript som användes i analysen

### Vind

```
Oskarp gräns = Con(Vind < 4.5, 0,  
                  Con(Vind > 8.5, 1, (Vind - 4.5) / 4)  
                  )  
                )
```

### Regionnät

```
Oskarp gräns = Con(Region <= 50 | Region >= 5880, 0,  
                  Con(Region > 50 & Region <= 120, (Region - 50) / (120 - 50),  
                    (Region - 5880) / (120 - 5880))  
                  )
```

```
Boolesk gräns = Con(Region <= 50, 0, 1  
                    )
```

### Vägar

```
Oskarp gräns = Con(vagar <= 50 | vagar >= 5880, 0,  
                  Con(vagar > 50 & vagar <= 120, (vagar - 50) / (120  
                    - 50), (vagar - 5880) / (120 - 5880))  
                  )
```

```
Boolesk gräns = Con(vagar <= 50, 0, 1  
                    )
```

### Bebyggelse

```
Oskarp gräns = Con(Bebygg < 400, 0,  
                  Con(Bebygg > 1000, 1, (Bebygg - 400) / 1000 - 400)  
                  )
```

```
Boolesk gräns = Con(Bebygg < 400, 0, 1  
                    )
```

### Natura 2000

```
Boolesk gräns = Con(n2000 <=0, 0, 1  
                    )
```

### Nationalparker

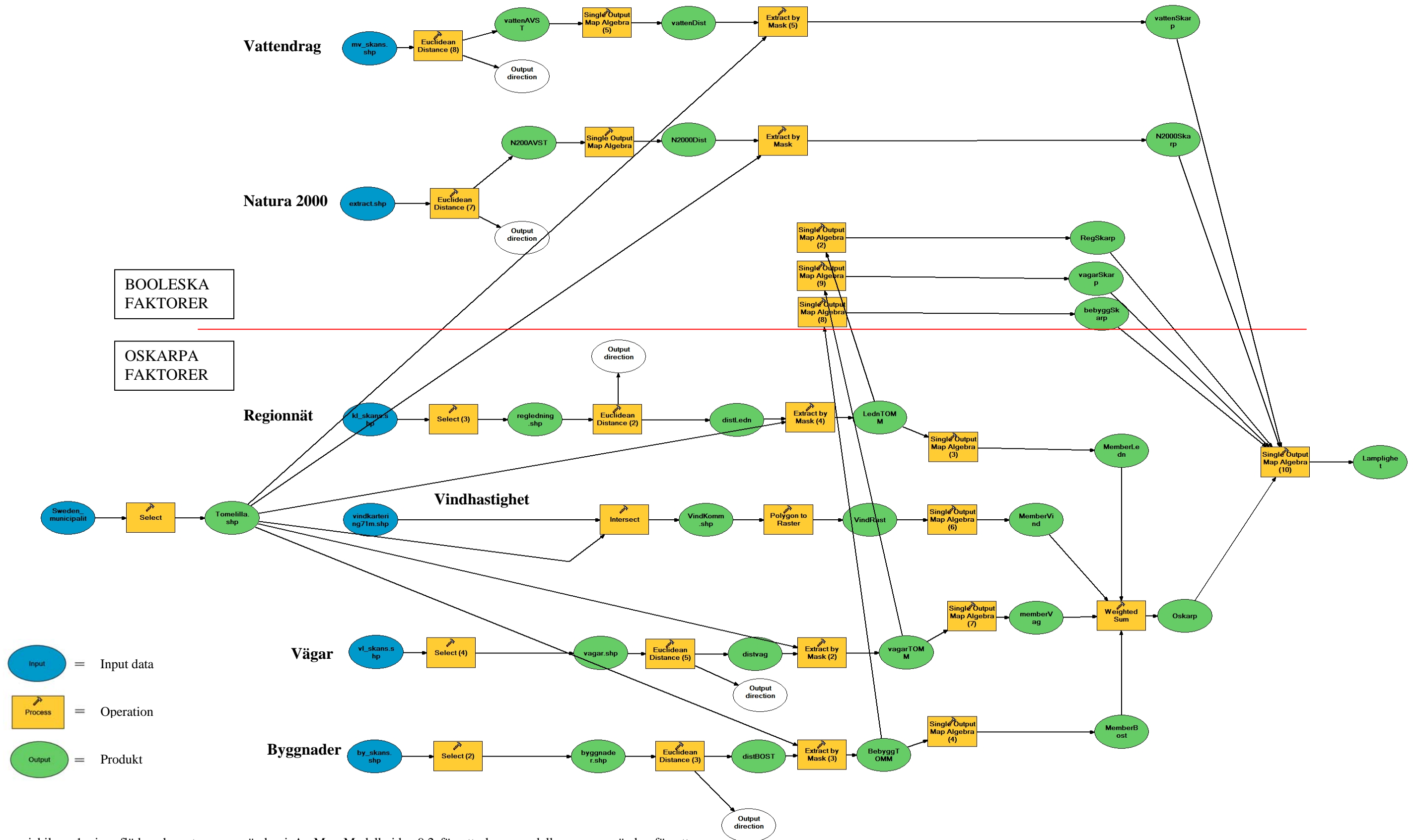
```
Boolesk gräns = Con(nationalpark <=0, 0, 1  
                    )
```

### Vattendrag

```
Boolesk gräns = Con(vatten <=100, 0, 1  
                    )
```

Bilaga 1 visar de skript som vi använde i rasteromräknaren som är inbyggd i ArcMap. Olika villkor(Con) definieras som resulterar i nya rastervärden mellan 0 och 1 beroende på om villkoren uppfylls eller ej. T.ex. räknas cellvärdet för vattendrag om till 0 om avstånd till vattendrag är mindre än 100 m, annars räknas den om till 1.

## Bilaga 2. Flödesschema över modellen i ArcMap modelbuilder 9.2



Figuren i bilaga 1 visar flödesschemat som användes i ArcMap Modelbuilder 9.2 för att skapa modellen som användes för att lokalisera lämpliga områden för vindkraftverk i ett översiktligt planeringsskede. Blåa rutor står för indata, gula rutor för processer och gröna rutor för produkten av processerna. Vita rutor står för processer som ej använts. Flödesschemat över den röda linjen beskriver databehandling av booleska faktorer och flödesschemat under den röda linjen beskriver databehandling av oskarpa faktorer.

Lunds Universitets Naturgeografiska institution. Seminarieuppsatser. Uppsatserna finns tillgängliga på Naturgeografiska institutionens bibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND. Serien startade 1985. Uppsatserna även tillgängliga på <http://www.geobib.lu.se/>

The reports are available at the Geo-Library, Department of Physical Geography, University of Lund, Sölvegatan 12, S-223 62 Lund, Sweden.

Report series started 1985. Also available at <http://www.geobib.lu.se/>

100. Hahn, K., (2004): Termohalin cirkulation i Nordatlanten.
101. Lina Möllerström (2004): Modelling soil temperature & soil water availability in semi-arid Sudan: validation and testing.
102. Setterby, Y., (2004): Igenväxande hagmarkers förekomst och tillstånd i Västra Götaland.
103. Edlundh, L., (2004): Utveckling av en metodik för att med hjälp av lagerföljdsdata och geografiska informationssystem (GIS) modellera och rekonstruera våtmarker i Skåne.
104. Schubert, P., (2004): Cultivation potential in Hambantota district, Sri Lanka
105. Brage, T., (2004): Kvalitetskontroll av servicedatabasen Sisyla
106. Sjöström, M., (2004): Investigating Vegetation Changes in the African Sahel 1982-2002: A Comparative Analysis Using Landsat, MODIS and AVHRR Remote Sensing Data
107. Danilovic, A., Stenqvist, M., (2004): Naturlig föryngring av skog
108. Materia, S., (2004): Forests acting as a carbon source: analysis of two possible causes for Norunda forest site
109. Hinderson, T., (2004): Analysing environmental change in semi-arid areas in Kordofan, Sudan
110. Andersson, J., (2004): Skånska småvatten nu och då - jämförelse mellan 1940, 1980 och 2000-talet
111. Tränk, L., (2005): Kadmium i skånska vattendrag – en metodstudie i föroreningsmodellering.
112. Nilsson, E., Svensson, A.-K., (2005): Agro-Ecological Assessment of Phonxay District, Luang Phrabang Province, Lao PDR. A Minor Field Study.
113. Svensson, S., (2005): Snowcover dynamics and plant phenology extraction using digital camera images and its relation to CO<sub>2</sub> fluxes at Stordalen mire, Northern Sweden.
114. Barth, P. von., (2005): Småvatten då och nu. En förändringsstudie av småvatten och deras kväveretentionsförmåga.
115. Areskoug, M., (2005): Planering av dagsutflykter på Island med nätverkanalys
116. Lund, M., (2005): Winter dynamics of the greenhouse gas exchange in a natural bog.
117. Persson, E., (2005): Effect of leaf optical properties on remote sensing of leaf area index in deciduous forest.
118. Mjöfors, K., (2005): How does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration affect vegetation productivity?
119. Tollebäck, E., (2005): Modellering av kväveavskiljningen under fyra år i en anlagd våtmark på Lilla Böslid, Halland
120. Isacson, C., (2005): Empiriska samband mellan fältdata och satellitdata – för olika bokskogsområden i södra Sverige.
121. Bergström, D., Malmros, C., (2005): Finding potential sites for small-scale Hydro Power in Uganda: a step to assist the rural electrification by the use of GIS

122. Magnusson, A., (2005): Kartering av skogsskador hos bok och ek i södra Sverige med hjälp av satellitdata.
123. Levallius, J., (2005): Green roofs on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefits.
124. Florén, K., Olsson, M., (2006): Glacifluviala avlagrings- och erosionsformer I sydöstra Skåne – en sedimentologisk och geomorfologisk undersökning.
125. Liljewalch-Fogelmark, K., (2006): Tåguller i Skåne – befolkningens exponering.
126. Irminger Street, T., (2006): The effects of landscape configuration on species richness and diversity in semi-natural grasslands on Öland – a preliminary study.
127. Karlberg, H., (2006): Vegetationsinventering med rumsligt högupplösande satellitdata – en studie av QuickBird-data för kartläggning av gräsmark och konnektivitet i landskapet.
128. Malmgren, A., (2006): Stormskador. En fjärranalytisk studie av stormen Gudruns skogsskador och dess orsaker.
129. Olofsson, J., (2006): Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6000 years.
130. Johansson, T., (2006): Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i stormfällan efter stormen Gudrun med hjälp av satellitdata.
131. Eckeskog, M., (2006) Spatial distribution of hydraulic conductivity in the Rio Sucio drainage basin, Nicaragua.
132. Lagerstedt, J., (2006): The effects of managed ruminants grazing on the global carbon cycle and greenhouse gas forcing.
133. Persson, P., (2007): Investigating the Impact of Ground Reflectance on Satellite Estimates of Forest Leaf Area Index
134. Valoczi, P. (2007): Koldioxidbalans och koldioxidinnehållsimulering av barrskog i Kristianstads län, samt klimatförändringens inverkan på skogen.
135. Johansson, H. (2007): Dalby Söderskog - en studie av trädarternas sammansättning 1921 jämfört med 2005
137. Kalén, V. (2007): Analysing temporal and spatial variations in DOC concentrations in Scanian lakes and streams, using GIS and Remote Sensing
138. Maichel, V. (2007): Kvalitetsbedömning av kväveretentionen i nyanlagda våtmarker i Skåne
139. Agardh, M. (2007): Koldioxidbudget för Högestad – utsläpp/upptag och åtgärdsförslag
140. Peterz, S. (2007): Do landscape properties influence the migration of Ospreys?
141. Hendrikson, K. (2007): Småvatten och groddjur i Täby kommun
142. Carlsson, A. (2008): Antropogen påverkan i Sahel – påverkar människans aktivitet NDVI uppmätt med satellit.
143. Paulsson, R. (2008): Analysing climate effect of agriculture and forestry in southern Sweden at Högestad & Christinehof Estate
144. Ahlstrom, A. (2008): Accessibility, Poverty and Land Cover in Hambantota District, Sri Lanka. Incorporating local knowledge into a GIS based accessibility model.
145. Svensson T. (2008): Increasing ground temperatures at Abisko in Subarctic Sweden 1956-2006
146. af Wåhlberg, O. (2008): Tillämpning av GIS inom planering och naturvård - En metodstudie i Malmö kommun.