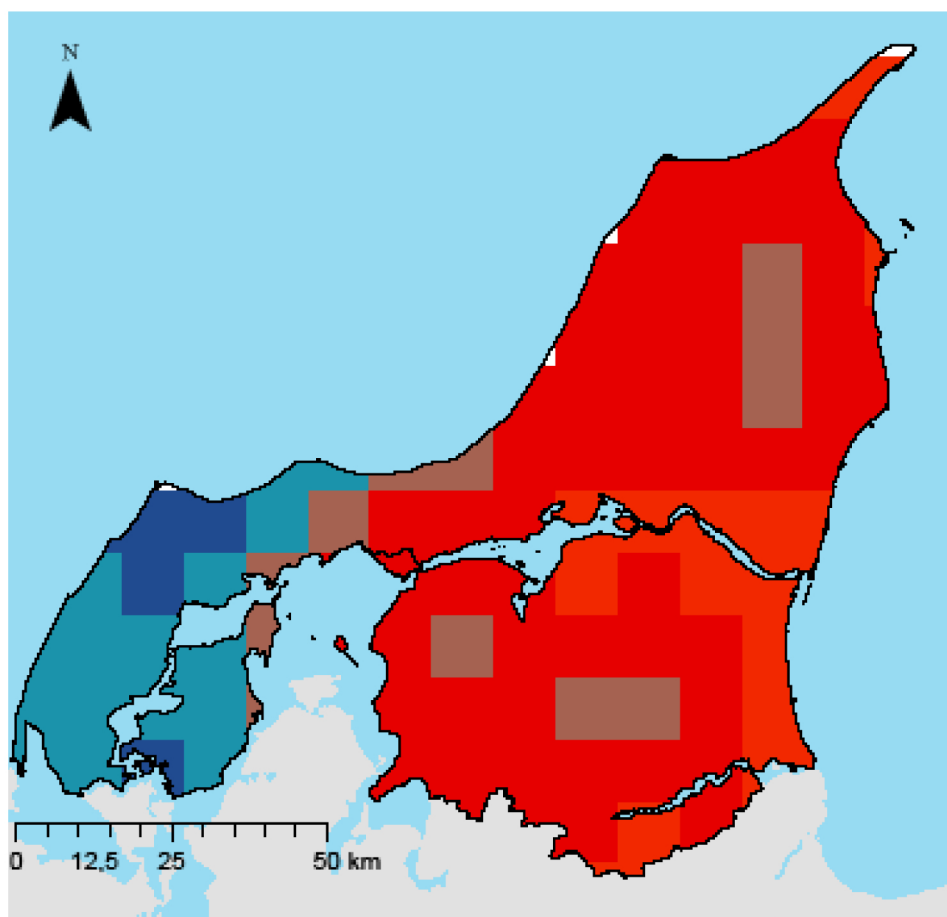


# Rumlig Analyse af Forskelle i Nedsivning mellem Landbrug og Skov i Region Nordjylland på Baggrund af Nuværende Klima og Fremtidige Klimascenarier.

Specialeafhandling  
af  
Bodil Porsbøl Jacobsen  
Naturgeografi



**Titel:** Rumlig analyse af forskelle i nedsivning mellem landbrug og skov i Region Nordjylland på baggrund af nuværende klima og fremtidige klimascenarier.

**Semester:** 10. semester

**Semester tema:** Kandidatspeciale

**Projektperiode:** Juni 2011-oktober 2011

**ECTS:** 30

**Vejleder:** Eva Ritter (AAU),  
Bernd Munier (ekstern vejleder, DMU)

**Projektgruppe:** 1

**SYNOPSIS:**

Skovrejsning bruges i den kommunale planlægning til beskyttelse af grundvandsmagasiner og til fremme af andre miljømæssige og sociale anliggender. Ændringen i nedsivning ved skovrejsning medvirker dog også en reduktion af nedsivningen fra området. Denne specialeafhandling har til formål at undersøge tidlige og rumlige forskelle i nedsivningen for landbrug på sand- og lerjord samt løvskov og nåleskov for region Nordjylland. Desuden undersøges den samlede nedsivning ved ændring fra landbrug til skov på udpegede skovrejsningsarealer. Til simulering af nedsivningen, bruges et rodzonemodul. Resultaterne viste signifikante forskelle i nedsivningen mellem de fire arealtyper. Den rumlige fordeling af nedsivningen fulgte variationerne i nedbørsmængderne. Ændringen i nedsivning fra landbrug til skov, viste kun rumlige forskelle af mindre betydning. Den samlede forskel i nedsivningen fra landbrug til skov på skovrejsningsområder, kan for større arealer medvirke til en mindskning af den tilgængelige drikkevandsressource. Dog medvirker øget nedbør under de fremtidige klimaændringer til en udligning af de nuværende ændringer i nedsivningen ved skovrejsning.

---

Bodil Porsbøl Jacobsen

Oplag: 3 stk.  
Antal sider: 37 sider  
Appendiks: 0  
Bilag: 2

## **Forord**

Dette projekt er udarbejdet i perioden 1. februar – 15. oktober på Institut for Byggeri & Anlæg på Aalborg Universitet. Projektet udgør min specialeafhandling på uddannelsesretningen Naturgeografi. I forbindelse med specialeafhandlingen har jeg haft specialeplads på DMU i afdelingen for systemanalyse under ekstern vejledning af Bernd Munier. Hovedvejleder på dette Projekt er Eva Ritter fra Aalborg Universitet.

At nå til denne færdige rapport har været en spændende omend stor udfordring, idet nogle af de metoder der anvendes i projektet var nye for mig. Dette har betydet, at megen tid er brugt på at lære og forstå opbygningen af de hydrologiske modeller, samt helt generelt at få overblik over området. Ikke desto mindre har projektet opmuntret mig til at fortsætte med at lære mere omkring emnet.

*Aalborg, oktober 2011*

Bodil Porsbøl Jacobsen

# INDHOLD

1. Indledning .....	9
1.1. Problemformulering .....	9
2. Teori .....	11
2.1. Vandets kredsløb .....	11
2.2. Fremtidige klimaændringers indvirkning på vandets kredsløb .....	12
2.3. Forskelle i vandbalancen .....	12
2.4. Vandbalancemodellering .....	13
3. Metode .....	15
3.1. Områdebeskrivelse .....	15
3.2. Modelopstilling .....	16
3.3. Rodzonemodul .....	16
3.4. Dataindsamling .....	18
3.5. Kritik af metode .....	19
4. Resultater og diskussion .....	20
4.1. Tidslige og rumlige variationer i nedsivningen .....	20
4.1.1. Nedsivning fordelt på arealanvendelse .....	20
4.1.2. Rumlig variation i nedsivningen .....	21
4.1.3. Sæsonvariationer i nedsivningen .....	26
4.1.4. Nedsivning i den nuværende og fremtidig klimaperiode .....	26
4.1.5. Diskussion af tidslige og rumlige variationer i nedsivningen .....	27
4.2. Ændringer i nedsivning ved skovrejsning .....	28
4.2.1. Diskussion af ændringer i nedsivning ved skovrejsning .....	29
5. Konklusion .....	32
6. Perspektivering .....	33
7. Referenceliste .....	34
Bilag 1 .....	36
Bilag 2 .....	37

# 1. INDLEDNING

Drikkevandsressourcen i Danmark er flere steder under pres, hvilket til dels skyldes at den geografiske fordeling af vandressourcen ikke svarer til den geografiske variation i befolkningstætheden. Desuden må flere pumpestationer lukkes som følge af stigende forurening af grundvandet med pesticider og gødning. Klimaændringerne kan føre til flere ekstreme nedbørshændelser hvor udvaskning af pesticider og gødning øges (IPCC, 2007) (Bahrenscheer & Mortensen, ukendt år).

Øget og ændret nedbør kan desuden betyde stigende grundvandsspejle, hvormed der kan opstå kontakt med forureningskilder i højere jordlag og derved øge udslip af farlige stoffer til grundvandet (Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen, 2010). Ønsket om en fortsat bæredygtig drikkevandsressource med rent, urensset drikkevand, trues således både i form af forringelsen af kvantiteten og kvaliteten af drikkevandet.

Der er fra regeringen og EU's side fremlagt en række nationale love og EU-direktiver, med blandt andre det formål at kunne sikre en bæredygtig drikkevandsressource. Regeringen har ydermere fremlagt en række handlingsplaner for rent drikkevand, hvor der udpeges indsatsområder til beskyttelse af drikkevandet. Disse indsatsområder omhandler blandt andet en øget beskyttelse af områder med drikkevandsinteresser, begrænsninger i arealanvendelsen og øget fokus på vandforbruget. Det er kommunerne, som har ansvaret for drikkevandsområdet, og kommunerne er derfor pålagt at føre tilsyn med indvindingen af drikkevand og drikkevandskvaliteten. Kommuneplanerne skal derfor tage hensyn til og inddrage de love og direktiver der omhandler beskyttelse af drikkevand.

Skovrejsning udgør en af de metoder, som kommunerne kan tage i brug i planerne om beskyttelse af drikkevandet. En omlægning af landbrugsarealer til skov medvirker til, at gødsugning med blandt andet kvælstof ophører, samtidig med at der efter skovrejsning indtræder en øget filtrering af nitrat fra det vand som nedsviver\* til grundvandet. Skovrejsning opprioriteres derfor

\***Nedsvivning:** Nedsvivning fra rodzonen, også kaldet *nettonedbør* (Plauborg et al, 2002). Nedsvivning fra rodzonen beskrives fortløbende i rapporten som *nedsvivning*.

i udpegede indsatsområder, det vil sige områder hvor nødvendigheden for grundvandsbeskyttelse er særlig høj. Skovrejsning tilgodeser derudover andre politiske mål såsom øgede bynære rekreative skovområder, flere grønne korridorer, beskyttelse af biodiversitet og reduktion af kuldioxid (CO<sub>2</sub>) (Ladekarl, 2005), (Gundersen & Bastrup-Birk, 2003), (Ladekarl, 2005).

Der har i flere årtier været fokus på skovrejsning. I 1989 besluttede folkettingen at det danske skovareal skulle øges til det dobbelte på en trægeneration, hvilket betyder at 20-25 % af det danske landareal skal være dækket med skov inden for 80-100 år. Målsætningen er implementeret i den danske skovlov, og en stigning i skovarealet forsøges opnået ved at frede nuværende skov, og ved at opfordre kommuner til at anvende skovrejsning som redskab til at opfylde andre miljøkrav (Kirkebæk & Thormann, 2000).

Skovrejsning medvirker imidlertid også til mindre grundvandsdannelse (Ladekarl, 2005), (Trier et al., 2003), hvilket kan skabe problemer for drikkevandsforsyningen i områder, hvor der i forvejen er sparsomt med grundvand. Nogle træsorter påvirker dog grundvandsdannelsen mere end andre, og valg af træsort ved skovrejsning er derfor ikke uden betydning.

Når skovrejsning bruges som redskab i indsatsplaner for beskyttelse af drikkevandsinteresser, er det derfor relevant at have indgående kendskab til, hvorledes skovrejsning påvirker vandbalancen.

## 1.1. PROBLEMFORMULERING

Formålet med dette projekt er opsummeret i følgende tre punkter:

- *at foretage en rumlig analyse af forskelle i nedsvivningen for arealtypeperne landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov.*
- *at foretage en sammenligning af nedsvivningen for ovenstående arealtyper under nuværende og fremtidige klimascenarier.*
- *At undersøge ændringen i nedsvivning i de af Region Nordjylland udpegede skovrejsningsarealer.*

Til besvarelse af problemformuleringen, vil der blive undersøgt hvilke forskelle i nedsvivningen, som kan forventes under henholdsvis landbrug og skov samt hvilke metoder der ofte bruges til sådanne undersøgelser. I analysen fokuseres der på at fremvise sammenhænge og uligheder i nedsvivningen på tværs af arealtyper,

lokaliteter og tid. Endeligt laves en analyse af hvilke ændringer i nedsivningen, der kan erfares ved skovrejsning på de ønskede skovrejsningsområder.

#### *Problemafgrænsning*

I rapporten foretages en række afgrænsninger, som er nødvendige for at kunne fokusere på områder, som ønskes undersøgt i henhold til at kunne besvare problemformuleringen.

Som caseområde for modelsimuleringer af nedsivningen er Region Nordjylland valgt. Region Nordjylland er interessant, fordi der i dette område er en relativ stor variation i nedbøren (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 3). Valg af geografi og tidsperiode i denne rapport gør det ikke muligt at opnå en høj detaljegråd (fx via målinger) af inputdata for de mange lokaliteter i regio-

nen. Der stiles derfor efter at beregne approksimerede værdier for nedsivning i caseområdet og ikke at opnå resultater, der afspejler sande værdier. Det formodes dog at de approksimerede værdier bidrager til et billede af størrelsesorden og tendenser i nedsivningen.

I rapporten inddrages landbrug som den arealanvendelse hvorved ændring til skov finder sted. Dette valg er taget ud fra den betragtning, at der politisk set er ønske om at begrænse forurening fra landbruget i indvindingsområder, og at der ved et skift fra landbrug til skov, kan opnås stor reduktion af forureninger til grundvandet.

I den hydrologiske modelopstilling er der foretaget en række afgrænsninger, således at de ønskede beregninger for det udvalgte område kan udføres. En nærmere beskrivelse af disse afgrænsninger kan ses i kapitel 3.

## 2. TEORI

Dette kapitel har til formål at skabe en forståelse for de mekanismer, som påvirker vandbalancen, og som vil ligge til grund for de analyser, der foretages i projektet. Endvidere redegøres der for de undersøgelser og metoder der ligger til grund for den nyeste viden omkring vandbalancen under skov og mark samt ændringer i vandbalancen ved ændret arealanvendelse til skov.

### 2.1. VANDETS KREDSLØB

Vandets kredsløb styres af vind og vejr og påvirkes af de omgivelser der er til stede på en given lokalitet. I Danmark fordampes gennemsnitligt to tredjedele af nedbøren mens den sidste tredjedel strømmer til søer, vandløb, havet eller til grundvandet (Bastrup-Birk et al., 2003). Vandbalancen afhænger af klimatiske faktor såsom nedbør, temperatur og vind. Endvidere påvirkes vandbalancen også af landskabets udformning, det vil sige geomorfologien, jordarter og arealtyper (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 5). Menneskelig indvirkning på vandbalancen sker, i det åbne land, oftest i form af kunstvanding og/eller dræning af jorden. En simpel vandbalanceligning består af nedbør (N), fordampning (F), afstrømning (A), ændringen af vandindholdet i rodzonen ( $\Delta S$ ) inden for den målte tid ( $\Delta T$ ) og skrives:

$$N = F + A + \Delta S \Delta T$$

*Bestemmelsen af komponenterne i denne ligning samt enkelte nøglebegreber er forklaret nærmere i det følgende.*

#### *Nedbør*

Nedbør måles ofte direkte, hvorimod afstrømning og fordampning er væsentlig sværere at måle og derfor beregnes ud fra modelsimuleringer (Ladekarl, 2003), (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 5). I Danmark er nedbøren sæsonvarierende, og størstedelen af den årlige nedbør falder i efterårs- og vinterperioden.

#### *Fordampning*

Fordampningen er afhængig af vegetationen, geomorfologien og klimatiske faktorer som nedbør, luftfugtighed, solindstråling og temperatur. Nedbørmængden har stor indflydelse på fordampningen da den fordamp-

ning, som kommer fra våde overfladearealer efter et regnskyl (interceptionstabet) ofte udgør en væsentlig del af den samlede fordampning (Raulund-Rasmussen og Hansen, 2003), (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 5). Ud over interceptionstabet, finder fordampning fra skove sted ved transpiration gennem bladene eller nålenes spalteåbninger og ved fordampning direkte fra jordoverfladen (evaporation) (Bastrup-Birk et al., 2003), (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 5). Ofte defineres der en "reference-evapotranspiration", som kan anvendes til at estimere den aktuelle evapotranspiration ved yderligere at inddrage vegetations-specifikke parametre. Reference-evapotranspiration er den potentielle fordampning fra kortklippet græs velforsynet med vand, og beregnes ud fra klimatiske faktorer (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 5). En uddybende beskrivelse af beregninger af de forskellige komponenter i vandbalanceligningen findes i kapitel 3.4.

#### *Afstrømning*

Afstrømningen forgår i forskellige stadier og opdeles ofte i overfladeafstrømning og sidelæns afstrømning under jorden. Overfladeafstrømning finder sjældent sted i Danmark på grund af det forholdsvis flade terræn og det høje indhold af sand i jorden. I skove medvirker det porøse humuslag og endnu ikke nedbrudt materiale endvidere til en hurtig nedsvivning (Bastrup-Birk et al., 2003), (Ladekarl, 2003). Overfladeafstrømningen kan derfor ofte fravælges i vandbalanceligningen. Det er svært at redegøre for hvor meget vand, der løber sidelæns under jorden ud mod vandløb, og da der sker en forholdsvis hurtig perkolation ned til grundvandet på sandjord kan det ofte fravælges at skelne mellem sidelæns og vertikal afstrømning under jorden. På lerjord er chancen for sidelæns afstrømning dog større og endvidere er omkring 70 % af landbrugsjordene drænet med rør (Trier et al., 2003). På lerjord med landbrug må der derfor forventes en risiko for overestimering af mængden af nedbør som når grundvandet. I Jylland, hvor størstedelen af landbrugsjordene har en sandet jordbund, forventes det at 40 % af landbrugsjordene er drænet. Det forventes at dræning bidrager til en afstrømning svarende til 20-25 % af nedbøren (Trier et al., 2003).

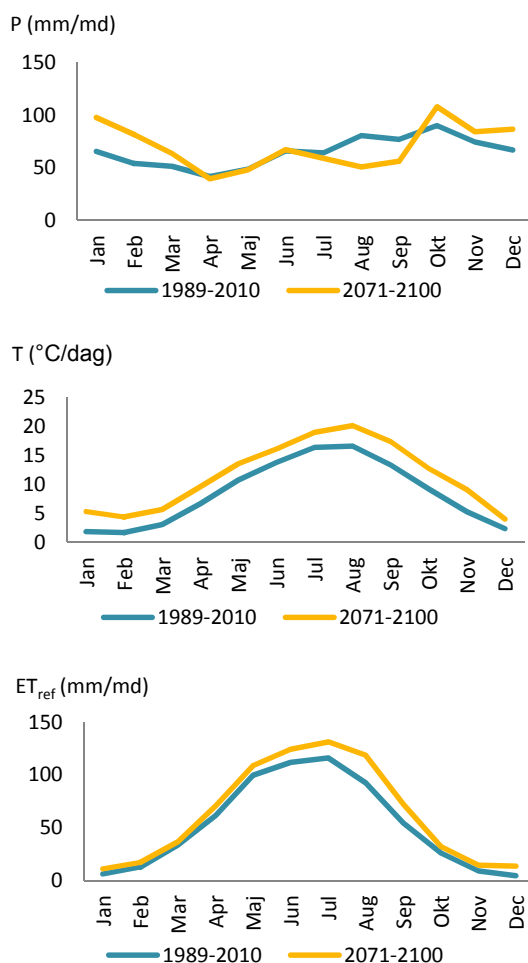
#### *Nedsvivning*

I sommerperioden er fordampningen oftest højere end nedbøren og derfor finder der en forholdsvis lille nedsvivning sted. Det modsatte er gældende om vinteren hvor nedsvivningen er forholdsvis stor (Bastrup-Birk, et al., 2003). Den hydrauliske ledningsevne bruges som et udtryk for vandets evne til at sive ned gennem jordlagene til grundvandet. Den hydrauliske ledningsevne påvirkes af vandindholdet i porerne, porestørrelsen, poresystemets struktur samt rodnettet. Afstrømning fra

rodzonen og den umættede zone til vandløb og søer samt afstrømning ved dræning medfører, at nedsvivningen gennem rodzonen og den umættede zone er markant større end den vandmængde der når grundvandet (Bastrup-Birk et al., 2003).

### Grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen beregnes hyppigst ved brug af modelsimuleringer på oplandsskalaer. Da skove størrelsesmæssigt ofte fremgår som mindre fraktioner i by- eller landbrugsdominerede oplande, har de ringe indvirkning på den simulerede grundvandsdannelse. I forhold til landbrug, er skoves påvirkning på grundvandsdannelsen derfor ikke synlig i større kortlægninger af grundvandsdannelse såsom i den nationale vandressourcemodel (Sonnenborg et al., 2008), (Højbjerg et al. 2010: 105). Hvis der ønskes kendskab til de hydrologiske ændringer ved skovdannelsen på landbrugsjord, er det derfor nødvendigt at inddrage detaljerede studier af grundvandsdannelse under skov.



Figur 2.1: Månedsgennemsnit for nedbør (P), temperatur (T) og reference-evapotranspiration (ET<sub>ref</sub>) i perioden 1989-2010 og perioden 2071-2100 under A2 klimascenarie. Data leveret af DMI (2011) og GEUS (2011).

## 2.2. FREMTIDIGE KLIMAÆNDRINGERS INDVIRKNING PÅ VANDETS KREDSLØB

Fremtidige klimaændringer skyldes en stigende CO<sub>2</sub>-koncentration i atmosfæren. På baggrund af forskellige fremtidsscenarioer om befolkningstilvækst, økonomisk og teknologisk udvikling og forventet energi- og resourceforbrug, har FN's klimapanel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) opstillet en række emissionsscenarioer (eller klimascenarioer) for de fremtidige CO<sub>2</sub>-koncentrationer i atmosfæren (IPCC, 2007). IPCC's klimascenarioer peger på, at der i fremtiden kan forventes ændringer i nedbøren, hvilket bevirker at nogle områder i hele eller dele af året kan opleve yderligere pres på drikkevandsressourcen. På baggrund af scenarioerne kan der ved hjælp af modelberegninger estimeres ændringer i temperatur, nedbør og fordampning (Sonnenborg et al., 2006), (Sonnenborg et al., 2007). I Danmark forventes det, at temperaturen stiger hele året mens nedbørsmængden øges i vinterperioden, og reduceres om sommeren (maj, juli, august og september) (se figur 2.1). De stigende temperaturer medvirker endvidere til en øget reference-fordampning, specielt i sommerperioden (Sonnenborg et al., 2006). Det forventes, at både grundvandsdannelsen og afstrømning til vandløb vil blive påvirket markant af fremtidige klimaændringer.

## 2.3. FORSKELLE I VANDBALANCEN

Forskelle i vandbalancen mellem skov og landbrug er undersøgt på nærliggende arealer med forholdsvis ens karaktertræk (typografi, klima mm.), se Bastrup-Birk et al. (2003), Hansen (red), (2003), Ladekarl et al., (2005) og Sonnenborg et al. (2008). I Gundersen & Bastrup-Birk (2003) og Ladekarl (2005) sammenfattes resultater for vandbalancen for forskellige arealtyper med særligt fokus på skovrejsning. De grundlæggende forskelle i interceptionstab, fordampning og nedsvivning for henholdsvis nåleskov, løvskov og landbrug er illustreret i tabel 2.1 og figur 2.2.

Fordampningen er mindst fra landbrug og størst fra skove (nåleskov), mens nedsvivningen under skov som udgangspunkt er mindre end nedsvivning under landbrugsjord. Dette skyldes primært, at mængden af nedbør der tilbageholdes i trækroneerne (interception) er større end den vandmængde der tilbageholdes hos afgrøder (Sonnenborg et al., 2008), (Trier et al., 2003). Trækroneerne kan opfange omkring 0,5-5 mm nedbør inden skovbunden bliver våd, afhængig af højde, ruhed, overflade- og bladareal. Hos de stedsegrønne nåletræer er interceptionen størst, da nålene året rundt kan opfanges nedbør, og dette medvirker til en højere årlig fordampning end den fra løvskove (Gundersen &



Bastrup-Birk, 2003), (Trier et al., 2003). Af figur 2.1 fremgår det, at der fra landbrugsområderne forventes en årlig nedsvivning på omkring 510 mm/år. Ved løvskov er nedsvivningen målt til omkring 430 mm/år mens nåleskov oplever en nedsvivning på omkring 320 mm/år. Difference mellem landbrug og hhv. løv- og nåleskov er således på 80 og 190 mm/år.

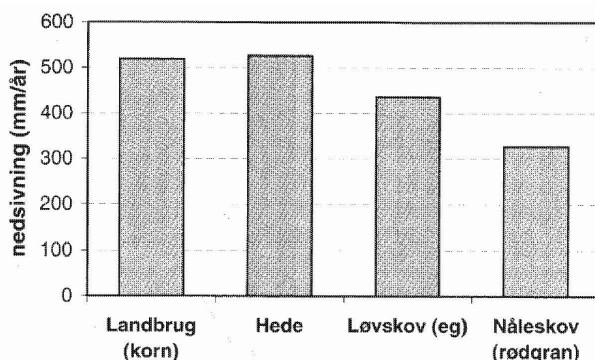
Også jordarten spiller en rolle i vandbalanceligningen. Lerjord bevirker at den vertikale afstrømning mod grundvandet begrænses og at vandet i stedet ledes ud til vandløb eller evapotranspirerer tilbage til atmosfæren. På leret landbrugsjord er der desuden oftest udlagt dræn hvilket yderligere begrænser nedsvivning til grundvandet (Ladekarl, 2003). Ved at sammenligne nedsvivningen fra skov på forskellige jordarter og på tværs af år med ens nedbør (hhv. 1994 og 1995), ses det, at nedsvivningen på lerjord er lidt lavere (0-50 mm) end på sandjord (Bastrup-Birk et al., 2003). Skovrejsning på sandjord vil altså have den største effekt på vandbalancen, mens der på lerjord ikke vil opnås store ændringer (mindst ved skovrejsning af løvtræer på landbrug) (Ladekarl, 2003).

Så vidt vides, er der i Danmark kun foretaget en enkelt undersøgelse af ændringer i vandbalancen før og efter skovrejsning. Undersøgelsen fandt sted ved Drastrup i Aalborg Kommune og påbegyndte i 1998. To evalu-

Tabel 2.1: Interceptionstab og fordampning fra landbrug, løvskov og nåleskov. Tallene bygger på undersøgelser af vandbalancer foretaget i Danmark (se Bastrup-Birk et al. (2003) og Ladekarl, (2003)).

	Interceptionstab <sup>1,2</sup> [mm/år]	Fordampning <sup>2,3</sup> [mm/år]
Landbrug	80-100	425 +/-50
Løvskov	100-140	475 +/-50
Nåleskov	> 200	575 +/-50

<sup>1</sup>Ladekarl (2003), <sup>2</sup>Ladekarl (2005), <sup>3</sup>Gundersen og Bastrup-Birk (2003).



Figur 2.2: Nedsvivning beregnet ved 900 mm nedbør per år på sandjord for landbrug, natur i det åbne land (hede), løvskov og nåleskov. Nedsvivning er estimeret på baggrund af data indsamlet i Bastrup-Birk et al. (2003).

ringsrapporter fra hhv. 2001 (Gundersen et al.) og 2005 (Gundersen & Buttenschøn) beskriver skovrejsningens effekt på vandbalancen. Vandbalancen er kun målt i perioden 1998-2001 og da beplantningen med skov først fandt sted i slutningen af 1999, er perioden for kort til at estimere ændringer i grundvandsdannelsen ved skovrejsning. I Gundersen & Buttenschøn (2005) viser beregner af nitratudvaskningen under skovrejsning, at nitratudvaskningen stort set ophører efter beplantning med skov. De korte målingsperioder vanskeliggør konklusioner for effekten af skovrejsning, men tendensen peger på, at grundvandkvaliteten påvirkes positivt allerede få år efter omlægningen.

## 2.4. VANDBALANCEMODELLERING

Der findes forskellige modeller til beskrivelse af det hydrologiske kredsløb. Afhængig af det ønskede output (grundvandsdannelse, nitratudvaskning, afstrømning, fordampning mm.) følger mere eller mindre komplicerede modelopstillinger samt forskellige krav til tilgængeligt inputdata (nedbør, jordart, vegetation mm.). Hydrologiske modeller kan både være statiske eller dynamiske (over en tidsperiode) og er ofte inddelt i forskellige moduler til beskrivelse af de hydrologiske processer i den overfladiske, umættede eller mættede zone (Sonnenborg & Henriksen, 2005). Her beskrives kort en vifte af forskellige modeller, som ofte bruges i forbindelse med modellering af vandbalancen i Danmark.

### *Evacrop og Daisy*

Evacrop og Daisy er programmer udviklet til undersøgelser på landbrug med forskelle i afgrøder, hvor landbrugsdata såsom afgrøde- og jordtype er centrale parametre. Evacrop bruges til beregning af nitratudvaskning, aktuel fordampning samt afstrømning fra rodzonen (Olesen og Heidmann, 2002). Daisy modellen er en fleksible jord-plante-atmosfære systemmodel (Soil-Plant-Atmosphere system Model) og kan simulere både vand- og varmebalance samt afgrødeproduktionen i et agroøkosystem (Hansen, 2002). Fælles for begge modeller er behovet for detaljeret inputdata som blandt andet sædskifte, gødskning, jordtype (fra A, B og C horisont), vanding og dræningsforhold.

### *COUP*

COUP modellen (**C**oupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems) er oprindeligt udviklet med fokus på jordbundsforhold i skove, men er siden hen blevet videreudviklet til at kunne simulere vand- og varmebalance gennem jordlag uafhængigt af vegetationstype (Jansson & Karlberg, 2001).

Både Evacrop, Daisy og COUP er velegnede til modelberegninger af hydrologiske karaktertræk på lokal-specifik skala, men behovet for store mængder lokal-specifik data gør ofte, at modellerne er for komplekse og tidskrævende for undersøgelser på regional eller national skala.

#### *DK-model*

I perioden 1996-2003 blev den national vandressourcemodel (DK-modellen) udviklet i et samarbejde mellem Miljø- og Energiministeriet og Danmarks & Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) (Højberg et al., 2010:5). DK-modellen har til formål at simulere vandbalancen og kortlægge den tilgængelige grundvandsressource på nationalt niveau med geografiske og tidsmæssige variationer. Til modellen hører grundvandsmodeller samt adskillige fysiske og dynamiske baserede numerisk hydrologiske modeller, der beskriver processer såsom snesmeltning, aktuel fordampning, overfladiske og underjordiske afstrømninger. DK-modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE 11 (Højberg et al., 2010). Til den første version af vandressourcemodellen, DK-model2003, blev en separat boksmodel af rodzonemodulet udviklet. I den nyeste opdatering, DK-model2009, er rodzonemodelleren efterfølgende blevet en integreret del af MIKE SHE (Højberg et al., 2010).

#### *Rodzonemodulet*

Rodzonemodulet fra 2003 er en simplificeret boksmodel som beregner fordeling af nedbør på aktuel fordampning og nedsivning fra rodzonen. Rodzonemodulet er en simpel vandbalancemodel hvor undermoduler beregner nedbørens forløb gennem rodzonen. Modellen er applikationsuafhængig, og de empiriske inputdata kan begrænses til de klimatiske samt generelle antagelser af

det potentielle vandindhold i rodzonen. I beregningen af den aktuelle fordampning er rodzonekapaciteten den styrende parameter og beregnes på baggrund af arealanvendelse og jordart (se definition af rodzonekapacitet i kapitel 3.4). Jo større detaljegraden er for disse inputdata, desto synligere bliver variationerne i nedsivningen. I DK-model2003 er rodzonekapaciteten sat til 150 mm for skov uafhængig af jordbund, 140 mm for lerjorde og 70 mm for sandjorde. Ud over rodzonekapaciteten bestemmes den aktuelle fordampning ud fra empiriske konstanter samt en afgrødekoeficient, som er sat til 1,0 med undtagelse af skov hvor afgrødekoeficienten er sat til 1,1 (se definition af afgrødekapacitet i kapitel 3.4). Vådområder forventes at være lig med den potentielle fordampning.

Uden lokalspecifikke inputdata om vegetationen og jordartens påvirkning på fordampningen (forskellen mellem potentiel og aktuel fordampning) er rodzonemodulet bedst egnet på større skalaer over længere tidsperioder, hvor forskelle i vegetationen i større grad udjævnes. På små tidshorisonter som fx døgnbasis kan det ikke forventes at rodzonemodulet afspejler den korrekte nedsivning fra rodzonen (Christensen & Henriksen, 2000). Sammenlignes Daisy og rodzonemodulet ses sæsonmæssige forskelle i nedsivningen, hvor Daisy programmet viser mere nedsivning om foråret og mindre nedsivning om efteråret end rodzonemodulet (Christensen & Henriksen, 2000). Forskellene udlignes dog på årsbasis hvor de to modeller ikke adskiller sig betydeligt fra hinanden (Christensen & Henriksen, 2000). Forskellen skyldes at Daisy modellen, har mulighed for at inddrage mere viden om plantevækst og kan derfor bedre afspejle den aktuelle fordampning fra planterne.

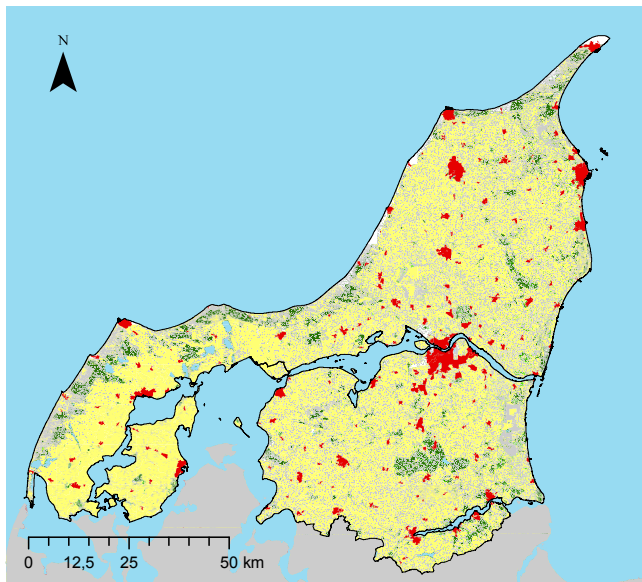
### 3. METODE

I dette kapitel beskrives området som danner ramme for beregninger og analyser i rapporten. Endvidere begrundes og diskuteres valget af rodzonemodulet som metode til beregning af nedsvivning ved forskellige arealtyper. I den forbindelse vil rodzonemodulets bestanddele blive beskrevet og diskuteret.

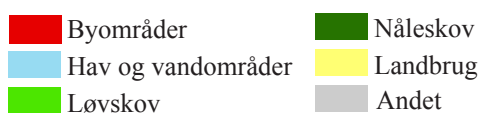
#### 3.1. OMRÅDEBESKRIVELSE

##### Skala

I denne rapport danner Region Nordjylland rammen for de følgende analyser. Region Nordjylland udvælges på baggrund af ønsket om en geografisk skala hvor rumlige forskelle og sammenhænge kommer til syne både i henhold til klimatiske variationer og til jordbundsforhold og arealanvendelse. I forhold til den politiske debat om skovrejsning, bidrager analyserne på regionalplan også til at synliggøre sammenhænge og variationer på tværs af politiske grænser.



Figur 3.1: Arealanvendelse baseret på gisdata fra CORINE Land Cover og AIS (DMU, 2011).

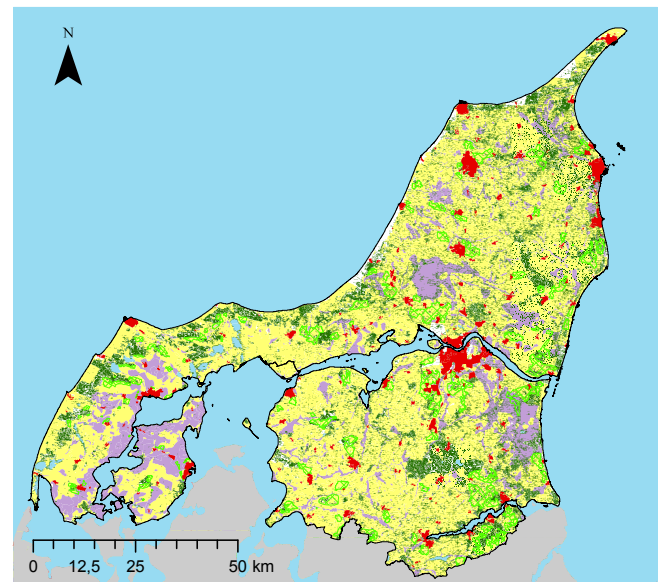


##### Arealanvendelse

Region Nordjylland dækker et areal på 7.900km<sup>2</sup> hvoraf Aalborg Kommune som den største udgør de 1.137km<sup>2</sup>. I Region Nordjylland er arealanvendelsen domineret af landbrug (5.700 km<sup>2</sup>) (se figur 3.1). Størstedelen af landbrugsarealerne er placeret på sandede jorde, mens de resterende landbrugsjorde ligger på lerjord (se figur 3.2). Det nuværende skovdække er på 670km<sup>2</sup>, hvor omkring 27 % er løvskov og resten nåleskov (DMU, 2011).

##### Skovrejsningsplaner

I den tidligere Regionplan fra 2005 og i kommunernes nuværende kommuneplaner er der udpeget et antal positive skovrejsningsområder, også kaldet ønskede skovrejsningsområder (se figur 3.2 og 3.3). De ønskede skovrejsningsarealer udgør i Region Nordjylland tilsammen 500km<sup>2</sup>. Ønskede skovrejsningsområder er områder, hvor offentlig skovrejsning primært vil finde sted. Desuden prioriteres områderne højt ved offentligt tilskud til privat skovrejsning. De overordnede mål for udpegningen af skovrejsningsområderne er sikring af drikkevandsinteresser og en forøgelse af det bynære friluftsliv og grønne netværk. Stigende nitratkoncentrationer i drikkevandet bevirker, at målet om sikring af drikkevandsinteresser via skovrejsning har stor prioritering (Jensen et al, 1999), (Aalborg Kommune,



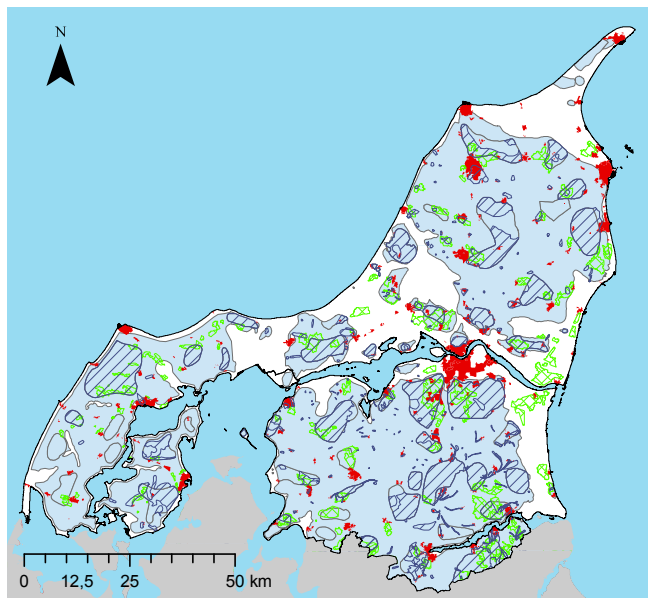
Figur 3.2: Inddeling af sand og ler baseret på Dansk Jordbrugsforsknings jordtypeklassificering, hvor jordtype 1-3 grupperes under sand og 4-10 under ler (se bilag 2). Ønsket skovrejsning er baseret på geodata fra Danmarks Miljøportal.



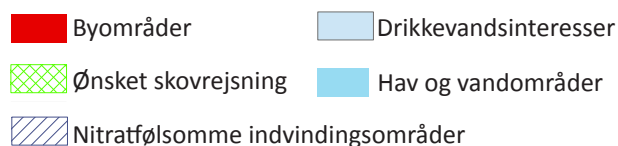
2010). De ønskede skovrejsningsarealer ligger primært på landbrugsområder med sandjord. Flere af arealerne ligger desuden i forlængelse af eksisterende skov mens andre grænser op til byområder (se figur 3.2). Der ligger ingen beslutning om, at alle de ønskede skovrejsningsarealer skal beplantes med skov, og de ønskede skovrejsningsarealer skal derfor ikke fejlfortolkes som det reelle antal arealer der forventes omlagt til skov.

### 3.2. MODELOPSTILLING

Valget af simuleringsmodel vil som udgangspunkt være påvirket af modstridende interesser; at være så overskuelige at anvende som muligt, men på tilstrækkelig vis opnå en vis detaljegråd. I dette studie ønskes der at finde rumlige forskelle i vandbalancen ved ændringer i arealanvendelsen. Dette ønskes gjort for Region Nordjylland, og siden indsamling af empiriske data fra hver specifik lokalitet vil være en for stor og tidskrævende opgave, foretrækkes der en modelsimulering med relativt få empiriske inputdata. Rodzonemodulet er en simplificeret model, som kan simulere grundvandsdannelsen ud fra enkelte datainput. Modellen er derfor velegnet til simulering på regional skala. En simulering ved brug af modellen kan dog forfines ved at gøre inputdataene mere specifikke i både tid og rum.



Figur 3.3: Drikkevandsinteresser og Nitratfølsomme indvindingsområder og ønsket skovrejsning er baseret på AIS data samt data fra Danmarks Miljøportal.

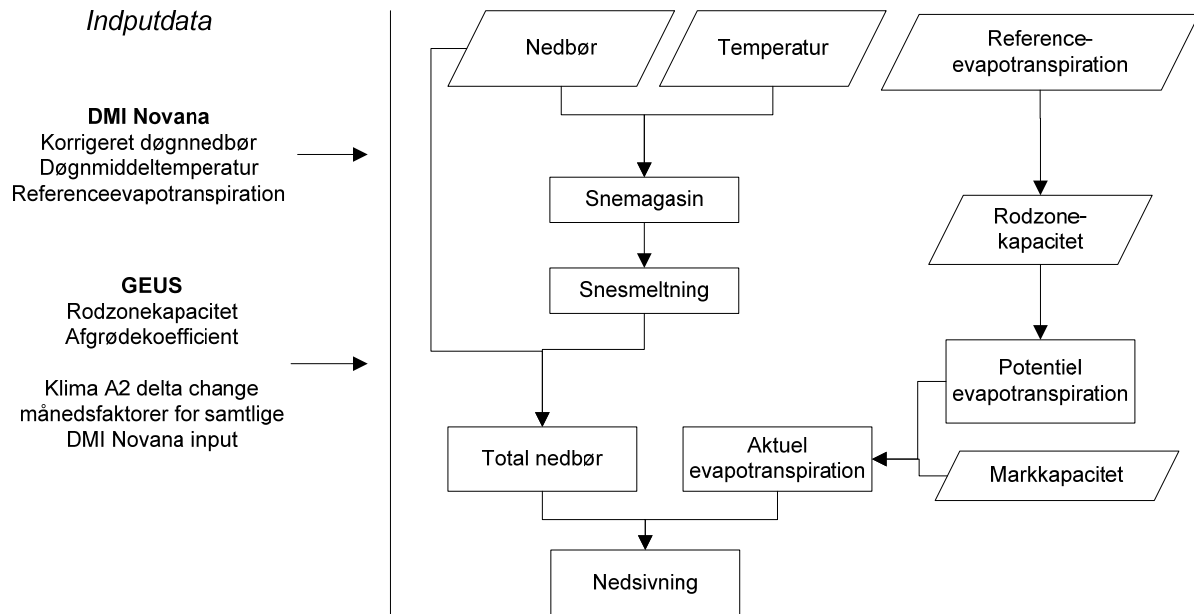


Som nævnt i ovenstående afsnit, er rodzonemodulets årlige beregning af vandbalancen sammenlignelig med Daisy-modellens resultater på årsbasis. I foråret og efteråret ses den største variation en mellem rodzonemodulet og Daisy-modellen, og det skyldes som før nævnt Daisy-modellens mulighed for, at tage hensyn til plantevækst og den dertilhørende rodzonedybde og aktuelle fordampning. De lokalspecifikke variationer kan til en vis grad implementeres i rodzonemodulet ved hjælp af rodzonekapaciteten og afgrødekoefficienten, som er vegetationsafhængig. De sæsonvariationer i plantevæksten, kan dog ikke implementeres. Dette skal der således tages hensyn til under diskussionen af resultaterne.

Alle beregningerne i rodzonemodulet er først opstillet i Microsoft Excel. Dette har givet mulighed for at opnå en detaljeret viden om de matematiske sammenhænge, som ligger bag modellen. For at kunne rumme store datamængder fra både datainput og output, er rodzonemodulet efterfølgende opstillet i statistikprogrammet SAS 9.2. Opstillingen i SAS bygger på en modelopstilling, som er udarbejdet af GEUS i forbindelse med DKmodel2003 og er videregivet til fri afbenyttelse i denne rapport (GEUS, 2011). Med GEUS' modelopstilling som skabelon, er en lignende model opstillet i SAS. Til validering af rapportens modelopstilling, sammenlignes dataoutput fra modellen med resultater fra GEUS' kørsler af deres egen model. Hertil er de samme datainput brugt. Rapportens modelopstilling er derefter modificeret således at nedsvivning fra de ønskede arealtyper udregnes.

Input- og outputdata er givet i døgnværdier, og outputdata for de daglige nedsvivningsmængder omregnes i modellen til måneds- sæson- og årsgennemsnit. Disse udtrækkes til Microsoft Excel, hvor der dannes grafer samt tabeller til ArcGIS til brug i kortfremstillingen.

På figur 3.4 ses en liste over datainput til rodzonemodulet samt en forsimplet skitse af de processer, som finder sted i modelkørslen. Skitsen kan bruges til at danne et overblik over hvilke processer de forskellige datainput indgår i. En mere dybdegående beskrivelse af de matematiske beregninger, som ligger til grund for rodzonemodulet følger i næste afsnit.



Figur 3.4: Skitse af processer i rodzonemodulet samt liste over datainput. Skrå kasser symboliserer inputdata mens rette kasser symboliserer beregningsprocesser.

### 3.3. RODZONEMODUL

Beregningsproceduren for aktuel evapotranspiration og nedsvivning fra rodzonen tager udgangspunkt rodzonemodulet. Inputdata er:

- Nedbør,  $P_{obs}$
- Temperatur,  $T$
- Rodzonekapacitet,  $\theta_{RK}$
- Afgørdekoefficient,  $K_c$
- Graddagskoefficient,  $C_{sne}$
- Reference-evapotranspiration,  $ET_{ref}$

Nedsivningen fra rodzonen beregnes ud fra:

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + (P_t - ET_a - R) \Delta t \quad (1)$$

hvor  $\theta$  er vandindholdet i rodzonen,  $P_t$  er det totale vandinput,  $ET_a$  er den aktuelle evapotranspiration,  $R$  er nedsvivningen (perkolationen ud af rodzonen),  $t$  er tiden og  $\Delta t$  er tidsskridt. Denne ligning har en meget simpel fysisk betydning. I ord kan ligningen beskrives som:

Vandindholdet i rodzonen et tidsskridt ud i fremtiden = vandindholdet i rodzonen nu + ændringen i vandindholdet sket over et tidsskridt.

Ændringen i vandindholdet beskrive som:

Ændring = vandinput fra nedbør - vand som fordamper - vand som nedsiver.

De fysiske størrelser, som indgår i modellen (temperatur, nedbør, fordampning og nedsvivning) varierer som

funktion af tid og sted, men i rodzonemodellen approksimeres de som værende konstante i små områder og tidsrum. På denne måde kan disse størrelses ændring over et område gennem en given tidsperiode beregnes ved at evaluere de samme ligninger en dag af gangen område for område.

Det totale vandinput,  $P_t$ , beregnes ud fra korrigeret nedbør,  $P_{obs}$ , samt vandfrigivelsen fra snemagasinet,  $P_s$ .

$$P_t = P_{obs} + C_{sne} T \quad \text{for } C_{sne} T \Delta t < S_{sne} \quad (2a)$$

$$P_t = P_{obs} + S_{sne} \quad \text{for } C_{sne} T \Delta t \leq S_{sne} \quad (2b)$$

Vandfrigivelsen fra snemagasinet beregnes ved brug af en graddagskoefficient,  $C_{sne}$  (3mm sne/dag/°C) og den daglige middeltemperatur,  $T$ :

$$P_s = C_{sne} T \quad \text{for } T > 0^\circ\text{C} \quad (3a)$$

$$P_s = 0 \quad \text{for } T < 0^\circ\text{C} \quad (3b)$$

Den potentielle fordampning,  $ET_p$ , beregnes ved:

$$ET_p = K_c ET_{ref} \quad (4)$$

hvor  $K_c$  er afgørdekoefficienten, som antager værdi på baggrund af empiriske studier og  $ET_{ref}$  er referenceevapotranspirationen udregnet ved brug af Makkinklingningen.

Aktuel evapotranspiration  $ET_a$  beregnes ud fra:

$$ET_a = ET_p \quad \text{hvis } \theta(t) > 0.7\theta_{RK} \quad (5a)$$

$$ET_a = ET_p \left[ 0.188 + 2.0 \frac{\theta(t)}{\theta_{MK}} - 1.2 \left( \frac{\theta(t)}{\theta_{MK}} \right)^2 \right] \quad \text{hvis } \theta(t) < 0.7 \theta_{RK} \quad (5b)$$

hvor  $\theta_{RK}$  er rodzonekapaciteten.

Perkolation,  $R$ , genereres såfremt  $P_t - ET_a > 0$ .

Hvis  $P_t - ET_a < 0$ , vil  $R = 0$ .

Hvis  $P_t - ET_a > 0$ , udregnes  $R$  ud fra følgende lineære funktioner:

$$R = 0 \quad \text{for } \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t < 0.7\theta_{RK} \quad (6a)$$

$$R = 0.1(P_t - ET_a) \quad \text{for } 0.7\theta_{RK} \leq \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t < \theta_{RK} \quad (6b)$$

$$R = \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t - \theta_{RK} \quad \text{for } \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t \geq \theta_{RK} \quad (6c)$$

### 3.4. DATAINDSAMLING

Nedenfor gives en kort beskrivelse af dataene brugt i dette studie, samt deres ophavssted. Data brugt i modelkørslen er nedbør, temperatur, referenceevapotranspiration, rodzonekapacitet og afgrødekoefficient.

#### Klimatiske data

De klimatiske inputdata, korrigeret nedbør, temperatur og reference-evapotranspiration, er hentet hos DMI Novana (DMI, 2011). Dataene strækker sig over en 21 års periode fra 1989 til 2010. Den lange tidsperiode bidrager til en udjævning af eventuelle udsving i modelkørslen de første par år samt en udjævning af enkelte års klimatiske udsving fra årsnormalen. DMI har korrigeret rådataene for fejl og mangler i målingerne samt taget højde for lækcapaciteten for nedbør (derfor navnet *korrigeret nedbør*).

Til simulering af nedsvivning under et A2 klimascenarie bruges en delta change metode. Delta change metoden består i at ændre observerede vejrdata med delta change faktorer for derved at opnå datasæt for det fremtidige scenarie (van Roosmalen et al. 2009). Delta change faktorerne, som bruges i denne rapport er genereret fra

DMI's regionale klimamodel HIRHAM (se tabel 3.1). Modellen genererer tidsserier for forskellige klimascenarier for nedbør, temperatur og referenceevapotranspiration for perioden 2071-2100 for Danmark.

De klimatiske inputdata er indsamlet for 118 gridceller som tilsammen dækker Region Nordjylland. Nedbørsdataene er tilgængelige i 10x10km gridceller mens reference-evapotranspiration og temperatur er tilgængelige i 20x20km gridceller. De 20x20km gridceller er derefter opdelt i 10x10 km gridceller således at hver 10x10 km gridcelle har en værdi for hver af de tre klimadata.

#### Rodzonekapacitet og jordart

Markkapacitet er den mængde vand, som jorden kan tilbageholde efter et regnskyld og hvor overskydende vand er nedsvivet (Petersen, 1994: 62). Rodzonekapaciteten er den maksimale vandmængde planterne kan optage inden de visner, også kaldet differencen mellem vandindholdet ved markkapacitet og visnegrænse inden for den aktuelle rodtybde. Rodzonekapaciteten er en vigtig parameter i forbindelse med fremstillingen af geografiske forskelle i vandbalancen. Rodzonekapacitetens størrelse afhænger af porrestørrelserne i jordlagene, hvor rodzonekapacitet er mindre for sandjord end for lerjord. Rodzonekapacitetens størrelse kan således udregnes efter jordart og vegetationstype (Henriksen & Sonnenborg, 2003: kap 6). Da det i denne rapport ikke er kendskab til den konkrete jordart og vegetation på samtlige arealer, opstilles i stedet tre hovedgrupper med tildelte værdier for rodzonekapaciteten: 70 mm for sandjord, 140 mm for lerjord og 150 mm for skov. Værdierne bygger på satser brugt i DK-modellens rodzonomodul (Sonnenborg et al., 2006). I Sonnenborg et al. (2008) vurderes der i et område for skov på lerjord, at rodzonekapaciteten ligger mellem 150-200 mm. Rapportens brug af en rodzonekapacitet for skov på 150 mm vurderes derfor til at være lavt sat.

#### Afgrødekoefficient

Afgrødekoefficienten, eller overfladekoefficienten ( $K_c$ ) beskriver forholdet mellem den aktuelle og potentielle fordampning for en bestemt afgrøde.  $K_c$  påvirkes af afgrødens karakteristika (afgrødetype, vækstsæson, høst mm.) og det formodes, at meteorologiske faktorer spiller en ubetydelig rolle. Det accepteres derfor også at standardværdier for  $K_c$  bruges på tværs af områder og

Tabel 3.1: A2 delta change faktorer for nedbør (P) reference-evapotranspiration ( $ET_{ref}$ ) og temperatur (T), efter van Roosmalen et al., (2009).

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
P	1,49	1,51	1,24	0,95	0,99	1,02	0,92	0,63	0,73	1,2	1,13	1,3
T	3,51	2,7	2,57	2,95	2,86	2,35	2,59	3,53	4,08	3,53	3,82	3,03
$ET_{ref}$	1,78	1,33	1,09	1,15	1,09	1,11	1,13	1,28	1,33	1,23	1,62	1,64

klima (Allen et al, 1998).  $K_c$  findes gennem empiriske studier af fordampningen fra forskellige afgrøder, hvor den målte fordampning sammenlignes med referenceevapotranspirationen (tætbevokset græs under samme klimatiske forhold).  $K_c$  er interessant i landbrugssammenhænge til at estimere vandingsbehov, og de fleste empiriske studier af  $K_c$  har da også fokus på landbrugsafgrøder. I Plauborg et al. (2002) opstilles månedlige værdier for  $K_c$  for udvalgte vegetationstyper (delvis baseret på Feddes et al. (1999)). Her antages skov at have en  $K_c$  på 1,1-1,2 hele året, hvor fordampning fra landbrug ligger omkring 1,0-1,1. En overordnet  $K_c$  for landbrug antages oftest at være lig 1,0 (Sonnenborg et al, 2008). I Plauborg et al. (2002) gives afgrøder med den højeste  $K_c$ , en værdi svingende mellem 1,0-1,15. I DK-modellens rodzonemodul bruges endvidere en værdi for  $K_c$  på 1 for landbrug og 1,1 for skov.

I denne rapport vælges  $K_c$  for landbrug at være lig 1,0. Det forventes at nåleskov har en større årlig fordampning end løvskov (Gundersen & Bastrup-Birk, 2003). Derfor sættes  $K_c$  for løvskov og nåleskov til hhv. 1,1 og 1,2.

### 3.5. KRITIK AF METODE

Rodzonemodulet er som tidligere nævnt en forsimplet model af vandbalancen i rodzonen, og det er derfor også vigtigt at tage hensyn til eventuelle fejl og mangler, som medfører at resultaterne i mindre grad afspejler virkeligheden.

Den rumlige variation i nedsivningen er i rodzonemodulet udelukkende bestemt af de klimatiske variationer. Det antages altså at både rodzonekapacitet og afgrødekoefficient ikke ændres når blot arealtypen er den samme. Fx antages det, at landbrug på sandjord har den samme rodzonekapacitet uafhængig af lokalitet til trods for, at den hydrauliske ledningsevne både lokalt og regionalt er forskellig, ligesom afgrødekoefficienten for landbrug er den samme selv om afgrødetype og vækstperiode varierer. Andre geografiske variationer såsom hældning og skygge er ligeledes ikke inkluderet i beregningerne i rodzonemodulet, og deres indvirkning på nedsivningen tages der således ikke højde for i de følgende analyser.

Detaljegraden i rodzonemodulet er af disse årsager ikke stor nok til, at den rumlige variation for hver enkelt arealtype kan tolkes som konkrete værdier for variationen af nedsivning for den enkelte arealtype, men det formodes, at de approksimerede værdier bidrager til et billede af størrelsesorden og tendenser i nedsivningen.

## 4. RESULTATER OG DISKUSSION

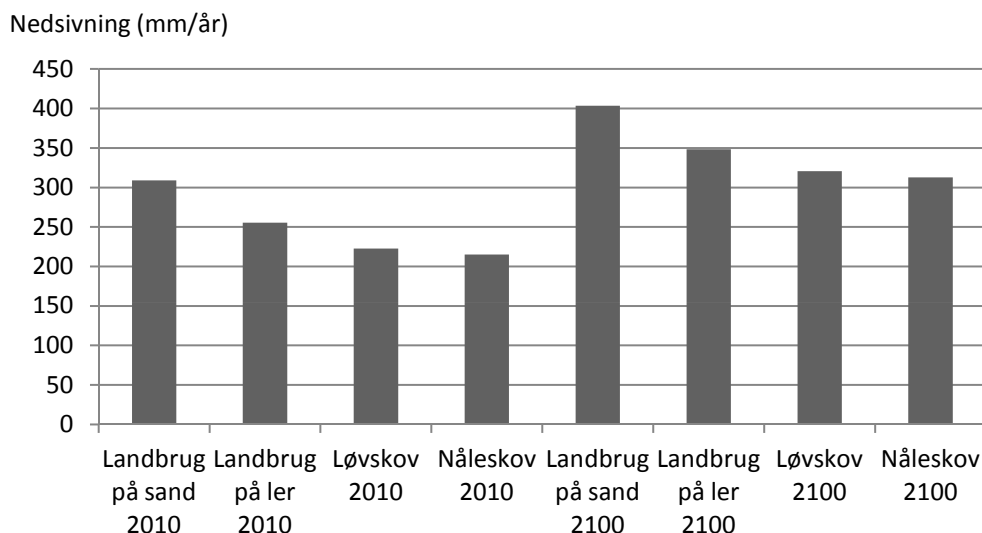
Dette kapitel har til formål at fremvise resultaterne fra rodzonemodulet, således at de efterfølgende kan indgå en diskussion og besvarelse af problemformuleringen. Hvert underkapitel indeholder desuden en diskussion af resultaterne. Nedsvivningen vil være inddelt efter de fire arealtyper; landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov. Præsentationen af nedsvivningsresultaterne vil ske ved hjælp af grafer og GIS-kort, og tidsperioderne vil skifte fra månedsgennemsnit til sæson- og årsgennemsnit. GIS-kortene er fremstillet således at signaturforklaringerne er ens for de fire arealtyper og for de samme sæsonperioder. Dette gør sammenligningen af nedsvivningen på de forskellige kort mere overskuelig. Dog har signaturforklaringerne den ulempe at resultaterne opdeles i et indeks der ikke bygger på en naturlig fordeling af det enkelte korts datasæt. For at forbedre præsentationen af variationerne i hvert enkelt kort, er der foretaget en klassificering af naturlige brud (eng. natural breaks ell. jenks) for hvert kort. Denne klassificeringsmetode identificerer en gruppeopdeling, hvor ens eller tætliggende værdier samles i en gruppe, og med en maksimal difference mellem grupperne (ESRI, 2007). De enkelte korts inddeling er derefter så vidt muligt forsøgt bibeholdt i den overordnede signaturforklaring. Der skal derfor tages højde for at rumlige variationer, som fremtræder på ét kort, muligvis ikke er synlige på et andet, da de forskellige værdier er blevet samlet under en og sammen gruppe.

### 4.1. TIDSLIGE OG RURLIGE VARIATIONER I NEDSVIVNINGEN

I dette afsnit vil de årlige og månedlige variationer i nedsvivningen gennemgås for de fire arealtyper; landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, nåleskov og løvskov. Dette gøres for resultater udregnet for det nuværende og fremtidige klima (ifølge IPCC's A2 klimascenarie). Yderligere analyseres de rumlige variationer af nedsvivningen.

#### 4.1.1. NEDSVIVNING FORDELT PÅ AREALANVENDELSE

Den årlige nedsvivning fra landbrug på sand- og lerjord samt fra løvskov og nåleskov vises på figur 4.1 for de to klimaperioder. I 1989-2010 er den årlige nedbørsmængde på omkring 780 mm, mens der i 2071-2100 forventes en årlig nedbørsmængde på omkring 840 mm. Nedsvivningen fra hver arealtype er knap 100 mm højere i 2071-2100 end i 1989-2010. De fremtidige klimaændringer medvirker således ikke til ændringer i de variationer der fra 1989-2010 ses på tværs af arealtype. Nedsvivning er størst fra landbrug på sandjord med hhv. 309 og 403 mm/år. Derefter følger landbrug på lerjord med hhv. 255 og 348 mm/år, og løvskov med hhv. 223 og 321 mm/år. Den laveste nedsvivning findes på arealer med nåleskov med hhv. 215 og 313 mm/år. På figur 4.1 ses desuden en forskel i nedsvivningen mellem landbrug på sandjord og løvskov på omkring 85 mm/år i begge klimaperioder. Forskellen mellem løvskov og nåleskov er på knap 8 mm/år. En parvis tosidet t-test ( $p=0,05$ ) (kilde) er brugt til at vurdere om værdierne er signifikant forskellige fra hinanden. Testen er brugt på vær-



Figur 4.1: Nedsvivning i mm/år for landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov i klimaperioderne 1989-2010 (markeret 2010) og 2071-2100 (markeret 2100).



dier for månedssum fra alle gridene i alle årene under hver enkelt klimaperiode. I alt 29.736 værdier for hver arealtype. T-testen viser at de årlige nedsvivningsværdier er signifikant forskellige fra hinanden.

Forskellen i nedsvivning mellem landbrug på sandjord og løvskov på omkring 85 mm/år, stemmer overens med de empiriske studier af nedsvivningen som blev vist i figur 2.2. Her ses en forskel på omkring 80 mm/år. Undersøges forskelle mellem løvskov og nåleskov er konklusionen dog en anden. Her ses en forskel på knap 8 mm i begge klimaperioder. Dette er væsentligt lavere end de forskelle vist i figur 2.2., hvor nedsvivning fra løvskov og nåleskov varierer med omkring 100 mm/år. I tabel 2.1 ses en forskel i fordampningen mellem løvskov og nåleskov på 100 mm, hvilket ligeledes bidrager til forventningen om en forskel i nedsvivningen på omkring de 100 mm. Det var derfor forventet, at forskelle mellem nåleskov og de resterende arealtyper ville være betydeligt større i denne undersøgelse. Afgrødekoefficienten er den eneste parameter, som adskiller beregningsmetoderne for løvskov og nåleskov i rodzonemodulet. Det formodes derfor at afgrødekoefficienten for løvskov og nåleskov ikke har været differentieret nok eller simpelthen har været utilstrækkelig i forhold til at skelne løvskov fra nåleskov.

Ovenstående resultater giver et overblik over den årlige nedsvivning i Region Nordjylland for de fire udvalgte arealtyper. For at undersøge hvorledes nedsvivningen variere efter lokalitet, vil resultaterne af de rumlige variationer i nedsvivningen fremvises i nedenstående afsnit.

#### 4.1.2. RURLIG VARIATION I NEDSVIVNINGEN

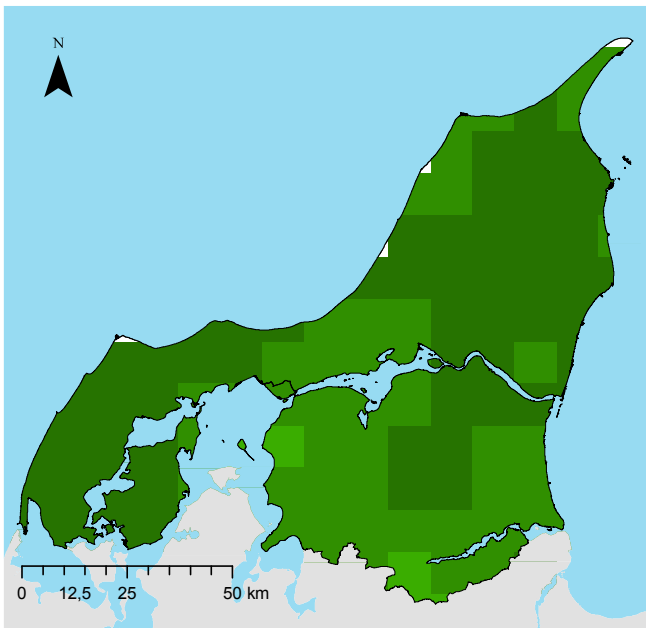
De rumlige variationer i nedsvivningen er forholdsvis ens på tværs af arealtyper og klimaperioder. Derfor beskrives de rumlige variationer ud fra de generelle træk, som spores i figur 4.2, 4.3, 4.4 og 4.5. De rumlige variationer i nedsvivningen er vist ved at give hver enkelt gridcelle en værdi tilhørende hver af de fire arealtyper. Hvis arealtypen er beliggende inden for en gridcelle antages det, at nedsvivningen fra arealtypen ligger i den farvegruppe som gridcellen tilhører. Da der i store dele af Region Nordjylland ikke er lerjord, fremviser flere af gridcellerne værdier for nedsvivningen fra lerjord, som i virkeligheden ikke er relevante. Områder med ler og sandjord eller skov er fremvist i figur 3.2. Det betyder også at den rumlige variation i nedsvivning på landbrug med lerjord, vil fylde mindre i resultatfremvisning og diskussion af de rumlige variationer i nedsvivningen.

Nedsvivningen er størst i de vestligste egne af Region Nordjylland og mindst langs østkysten og den østlige

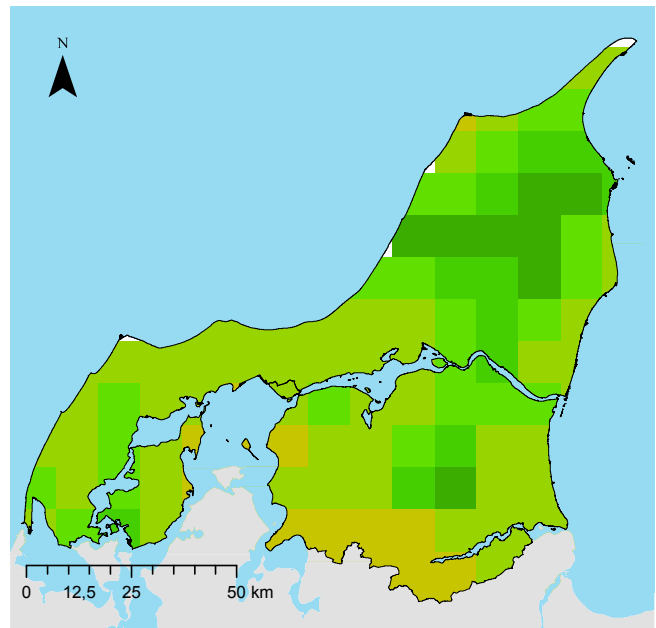
den af Limfjorden, samt i områderne syd for Mariager Fjord. Den rumlige forskel i nedsvivningen for hver enkelt arealtype op mod 150 mm/år. Nedsvivning i sommerperioden er størst nord for Limfjorden væk fra kystområderne, mens den højeste nedsvivning i vinterperioden finder sted i den vestligste del af Region Nordjylland. Da nedsvivningen er væsentlig større i vinterperioden, er det derfor også i denne periode, at de største rumlige variationer i nedsvivningen finder sted.

Nedsvivningen er afhængig af den totale nedbørsmængde fratrukket den aktuelle evapotranspiration (se ligning 10a-c i kapitel 3.3). Den rumlige variation i nedsvivningen er et resultat af ændringerne i de klimatiske faktorer, som varierer fra grid til grid. Det fremgår da også tydeligt at den rumlige variation i nedsvivningen følger den rumlige variationen i nedbøren (se bilag 1). I de vestligste områder hvor nedsvivningen er højest, ses dog også den højeste evapotranspiration (se bilag 1), hvilket i teorien ville bidrage til en relativ lavere nedsvivning. Grunden til, at nedbøren bliver den styrende faktor i den rumlige variation af nedsvivningen, skyldes at nedbørsmængden rumligt varierer betydeligt mere (op til 187 mm) end evapotranspirationen (op til 48 mm).

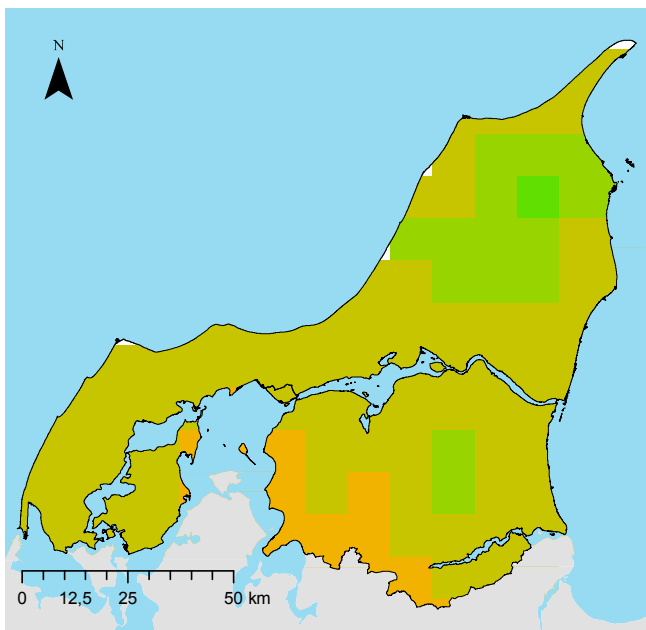
Maj-september 1989-2010



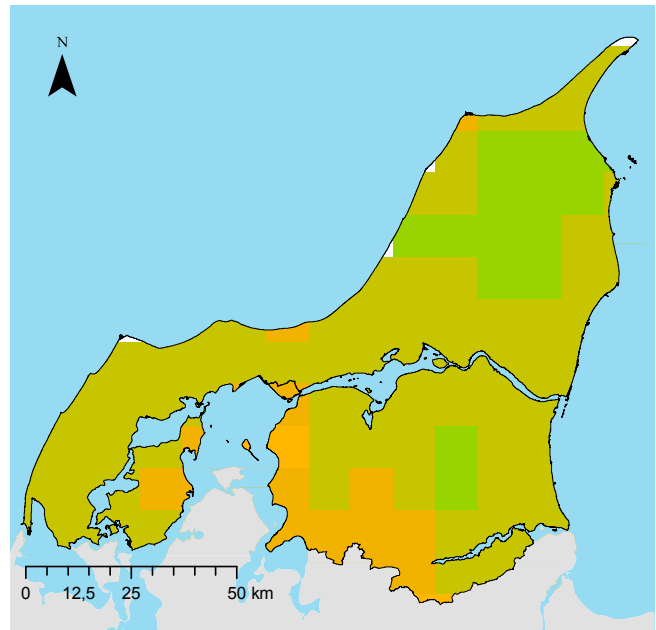
A: Samlet nedsvivning for landbrug på sandjord.



B: Samlet nedsvivning for landbrug på lerjord.

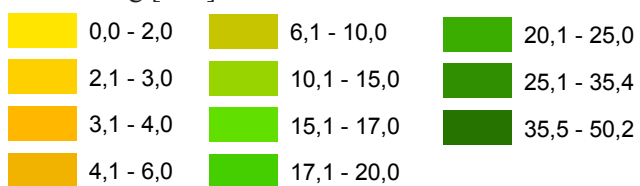


C: Samlet nedsvivning for løvskov.



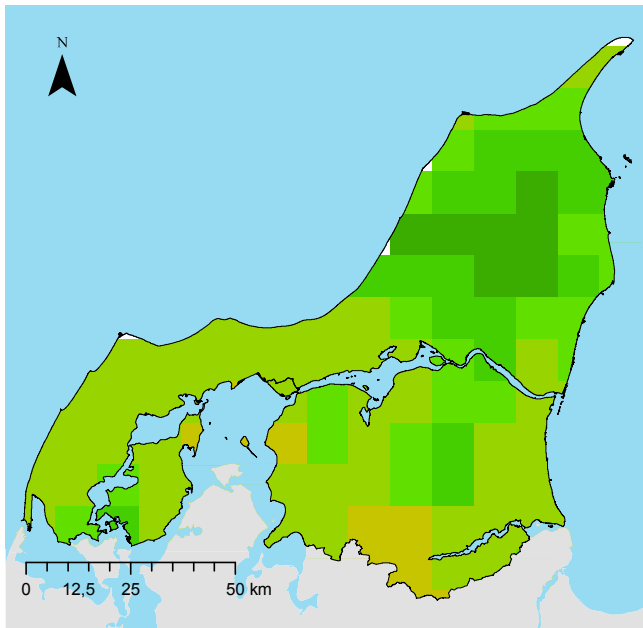
D: Samlet nedsvivning for nåleskov.

Nedsvivning [mm]

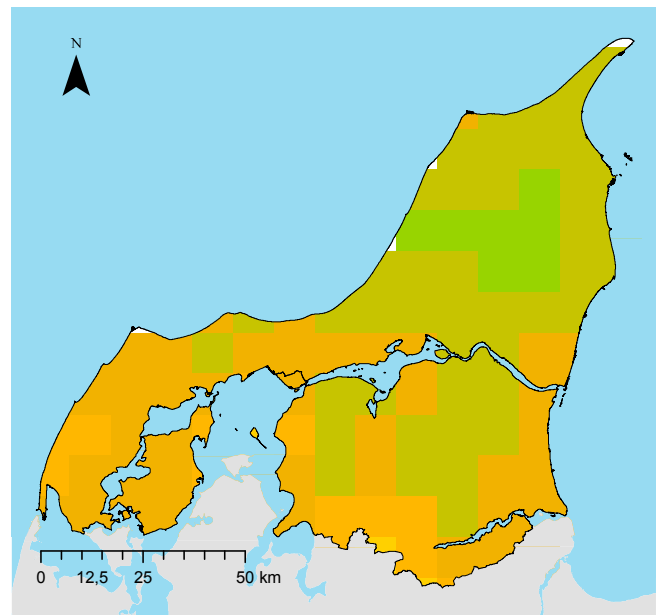


Figur 4.4: Samlet nedsvivning i perioden maj-september 1989-2010 vist for lanbrug på sandjord (a), landbrug på lerjord (b), løvskov (c) og nåleskov (d).

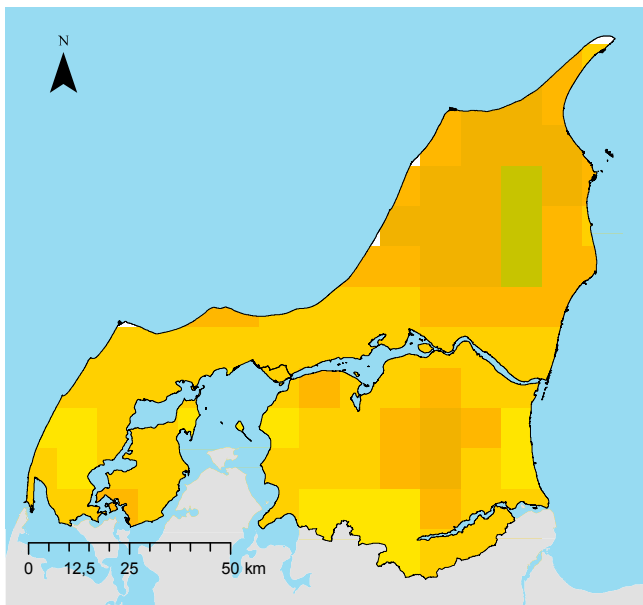
Maj-september 2071-2100



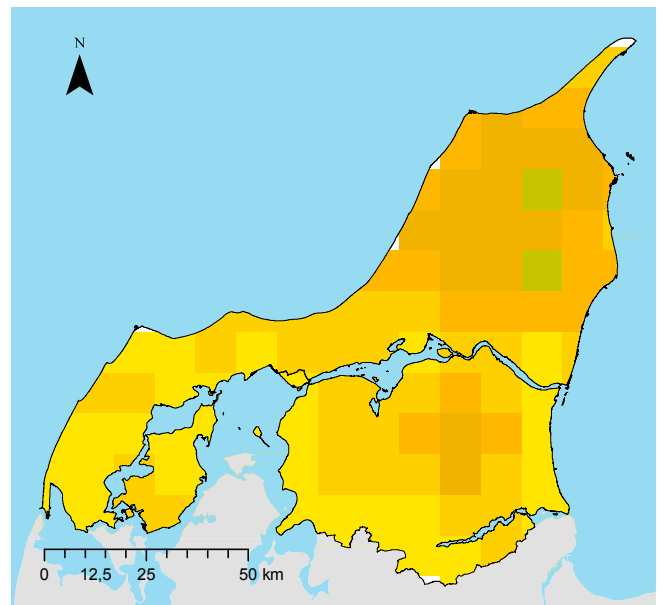
A: Samlet nedsvivning for landbrug på sandjord.



A: Samlet nedsvivning for landbrug på lerjord.

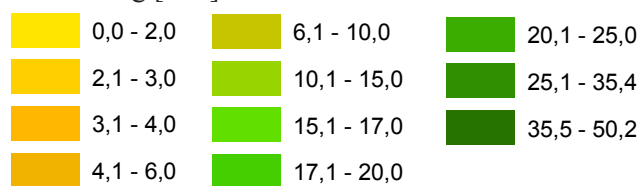


C: Samlet nedsvivning for løvskov.



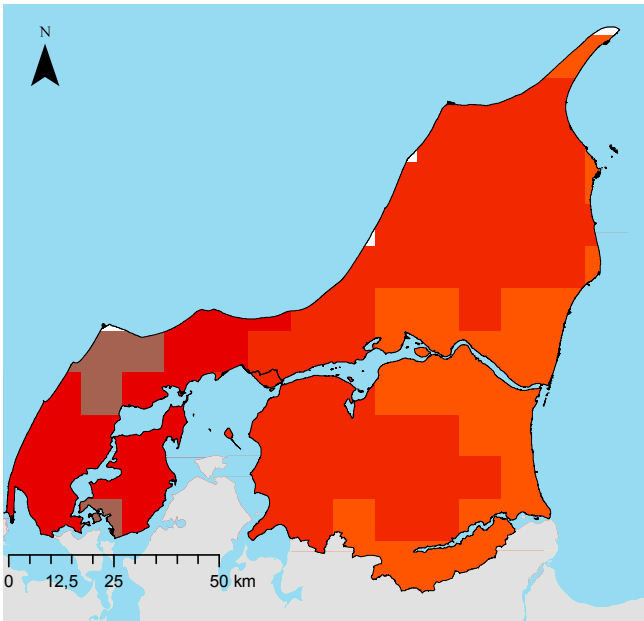
D: Samlet nedsvivning for nåleskov

Nedsvivning [mm]

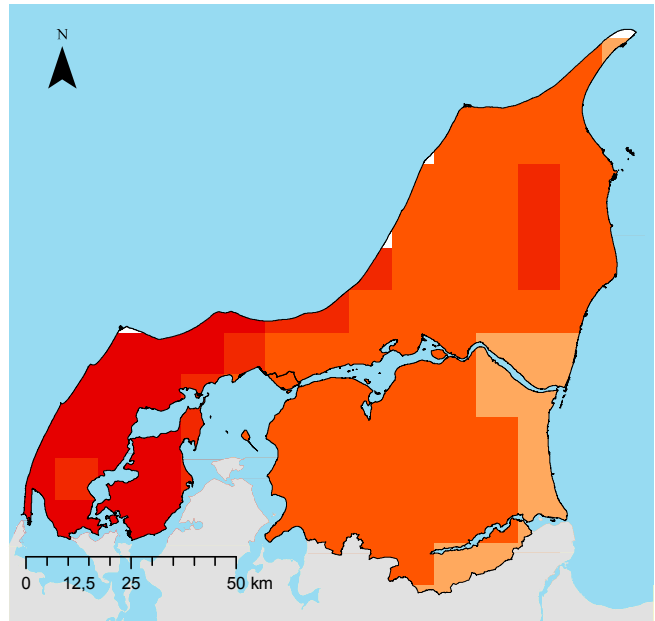


Figur 4.5: Samlet nedsvivning i perioden maj-september 2071-2100 vist for lanbrug på sandjord (a), landbrug på lerjord (b), løvskov (c) og nåleskov (d).

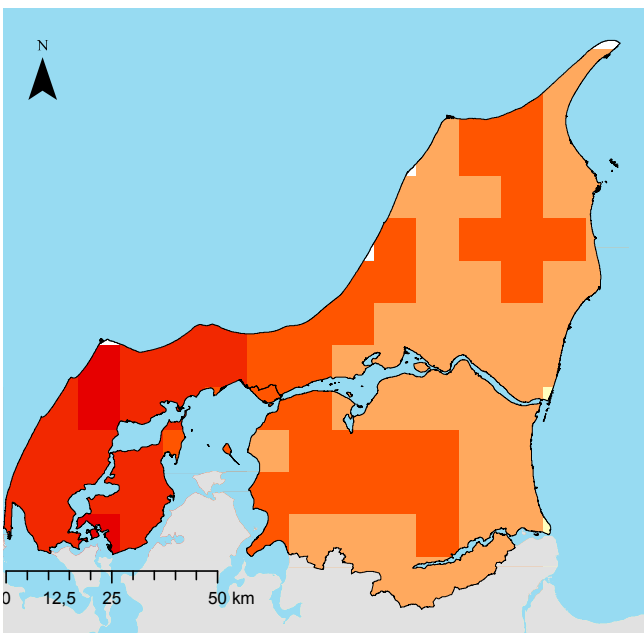
Oktober-april 1989-2010



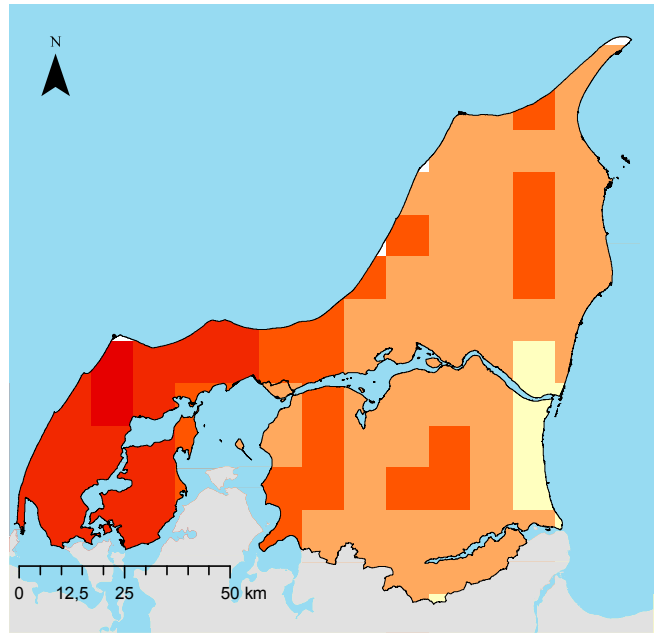
A: Samlet nedsvivning for landbrug på sandjord.



B: Samlet nedsvivning for landbrug på lerjord.

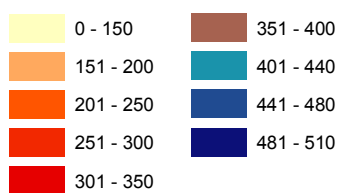


C: Samlet nedsvivning for løvskov.



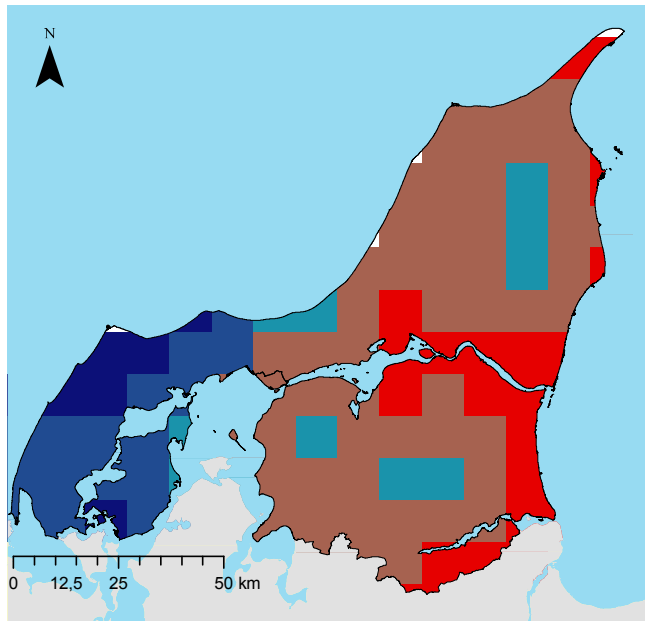
D: Samlet nedsvivning for nåleskov.

Nedsvivning [mm]

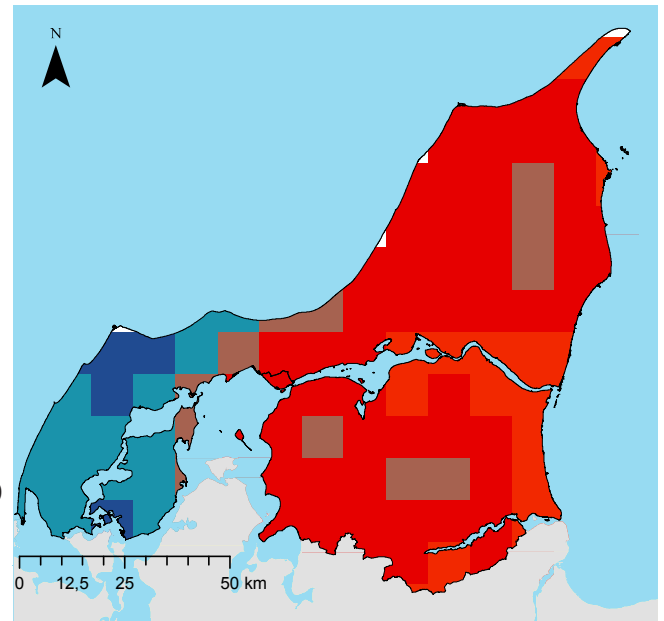


Figur 4.6: Samlet nedsvivning i perioden oktober-april 1989-2010 vist for lanbrug på sandjord (a), landbrug på lerjord (b), løvskov (c) og nåleskov (d).

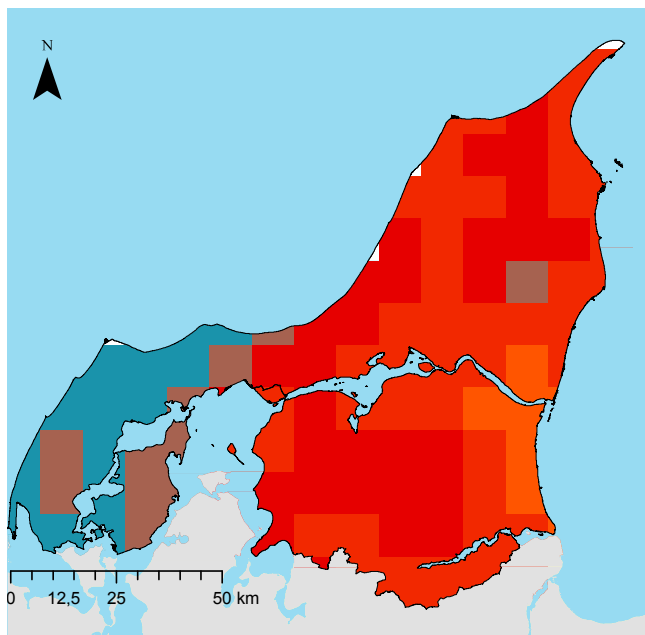
Oktober-april 2071-2100



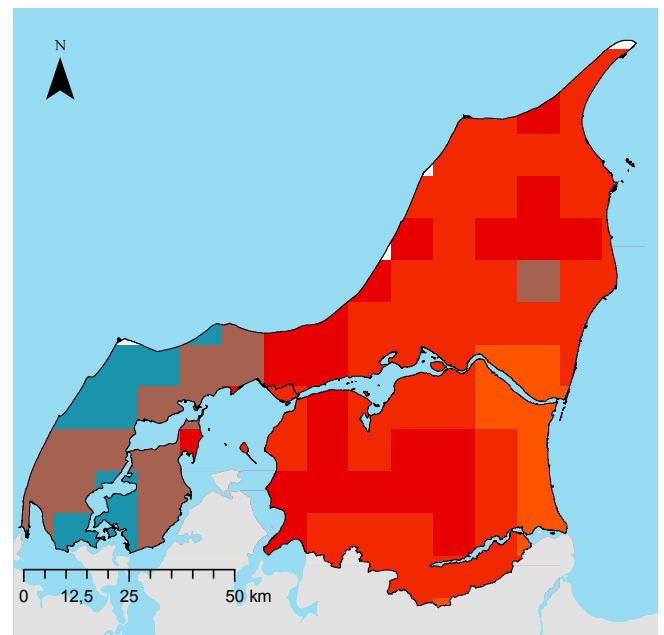
A: Samlet nedsvivning for landbrug på sandjord.



B: Samlet nedsvivning for landbrug på lerjord.

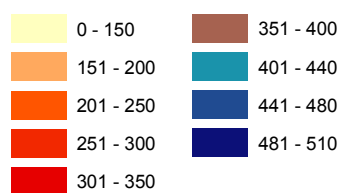


C: Samlet nedsvivning for løvskov.



D: Samlet nedsvivning for nåleskov

Nedsvivning [mm]



Figur 4.7: Samlet nedsvivning i perioden oktober-april 2071-2100 vist for lanbrug på sandjord (a), landbrug på lerjord (b), løvskov (c) og nåleskov (d).

#### 4.1.3. SÆSONVARIATIONER I NEDSIVNINGEN

Månedsgennemsnit for nedsvivning er vist i figur 4.6. og dækker over perioden 1989-2010.

Fælles for arealtyperne gælder at nedsvivningen øges markant i vintermånederne, hvor evapotranspirationen er lav, mens der i sommermånederne med høj evapotranspiration, kun finder meget lidt nedsvivning sted (se de månedlige fordelinger af evapotranspirationen på figur 2.1).

Nedsvivning fra landbrug på sandjord er den højeste i alle månederne bortset fra i januar, februar, marts og maj, hvor der ikke er noget signifikant forskel mellem landbrug på sandjord og landbrug på lerjord. Fra januar til maj varierer nedsvivningen ikke meget mellem de forskellige arealtyper, nedsvivningen falder fra måned til måned i takt med at mængden af nedbør falder og temperatur og evapotranspiration stiger (se figur 2.1). I maj, juni, juli og august er nedsvivningen lavest, og landbrug på sandjord har et månedsgennemsnit liggende mellem 2 og 7 mm/md. De resterende arealtyper ikke oplever et månedsgennemsnit over 2 mm/md. I disse måneder er evapotranspirationen og døgnmiddeltemperaturen højest, mens nedbørmængden igen stiger efter at have nået sit minimum i april måned. Fra september til december øges nedsvivningen igen i takt med at temperatur og evapotranspiration falder.

Den væsentligste forskel i nedsving mellem de forskellige arealtyper finder sted i efterårsmånederne. Nedsvivningen fra landbrug på sandjord øges mere end de resterende arealtyper, og når sin maksimale nedsvivning i november med en nedsvivning på 58 mm/md. I denne måned opnår landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov en nedsvivning på hhv. 47, 39, og 37 mm/md. Den største forskel i nedsvivningen finder sted i oktober måned, hvor nedsvivningen fra landbrug på sandjord er 45 mm/md, hvilket er hhv. 20 og 30 mm højere end nedsvivningen fra landbrug på lerjord og de to skovtyper. Valg af arealanvendelse i et område vil derfor få den største

betydning for nedsvivningen i denne periode.

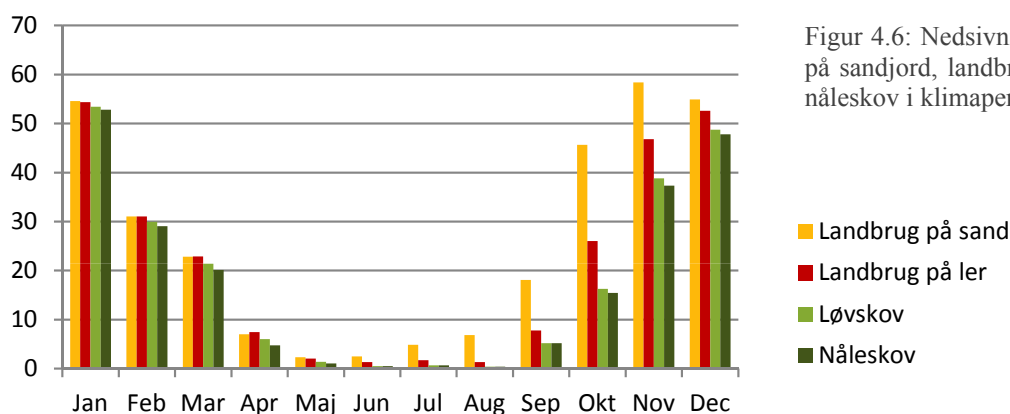
I efterårsmånederne hvor forskelle mellem landbrug sandjord og skov er størst, bidrager den lavere rodzonekapaciteter for landbrug på sandjord (70mm versus 150mm) til, at jorden oftere mættes på landbrug på sandjord og nedsvivning derfor oftere finder sted. Som et resultat af højere nedbørmængder og lavere temperaturer om vinteren, er vandindholdet i jorden ofte højere end rodzonekapaciteten for alle fire arealtyper og derfor varierer nedsvivningen ikke i samme grad som om efteråret.

#### 4.1.4. NEDSIVNING I DEN NUVÆRENDE OG FREMTIDIG KLIMAPERIODE

For at sammenligne månedsvariationer for arealtyperne i den nuværende og fremtidige klimaperiode, gives her et overblik over den akkumulerede årlige nedsvivning for de to klimaperioder. De enkelte måneder testes desuden for signifikante forskelle i nedsvivningen og igen bruges en parvis tosidet t-test ( $p=0,05$ ) (Walpole et al., 2007). For hver arealtype er testet 2478 værdier. I januar måned under den nuværende klimaperiode er der ingen signifikante forskelle mellem landbrug på sandjord og de tre resterende arealtyper. Der er ligeledes ingen signifikante forskelle mellem løvskov og nåleskov i august i den nuværende klimaperiode og i september for begge klimaperioder. Eller kan der ud fra resultaterne forventes signifikante forskelle mellem arealtyperne under hver enkelt måned.

Det ses af figur 4.7, at den akkumulerede nedsvivning for de fire arealtyper er højere i den fremtidige periode end i den nuværende, hvilket også blev vist på figur 4.1. Den akkumulerede nedsvivning for de forskellige arealtyper følger generelt den samme kurve, men i nogle måneder ses der dog forskelle på tværs af klimaperiode. I perioden juli til september øges nedsvivningen mere i den nuværende klimaperiode end i den fremtidige. Til

Nedsvivning (mm/md)



Figur 4.6: Nedsvivning i mm/md for landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov i klimaperioden 1989-2010.

gængæld øges nedbøren mere i januar til marts i den fremtidige klimaperiode. Forandringerne i nedsvivningen for den fremtidige klimaperiode stemmer overens med forandringerne i nedbøren som blev fremvist i figur 2.1. Her ses nemlig et fald i nedbøren i juli-september måned mens nedbøren er højere i januar-marts måned.

#### 4.1.5. DISKUSSION AF TIDSLIGE OG RURLIGE VARIATIONER I NEDSVIVNINGEN

Resultaterne af de tidslige og rumlige analyser af nedsvivningen viser, at nedsvivningen er størst i den fremtidige klimaperiode som et resultat af den årlige stigning i nedbøren. Denne tendens ses da også på månedsbasis bortset fra i dele af sommerperioden, hvor nedsvivningen er størst i den nuværende klimaperiode på grund af et fald i nedbøren i disse måneder under den fremtidige klimaperiode.

En sammenligning af nedsvivningen for de forskellige arealtyper under den nuværende og fremtidige klimaperiode, giver et billede af hvorledes vores drikkevandsressourcer påvirkes af forskellige arealtyper nu og i fremtiden. Ved at ændre arealanvendelsen fra landbrug til skov, mistes knap 100 mm/år af den vandmængde som nedsiver fra rodzonen. I fremtiden kan dette tab dog forventes at blive udlignet på grund af de øgede nedbørmængder. Ved en omlægning af landbrug til skov kan man derfor forvente at mængden af nedsvivning er den samme 60-90 år som i den nuværende periode før skoven plantes.

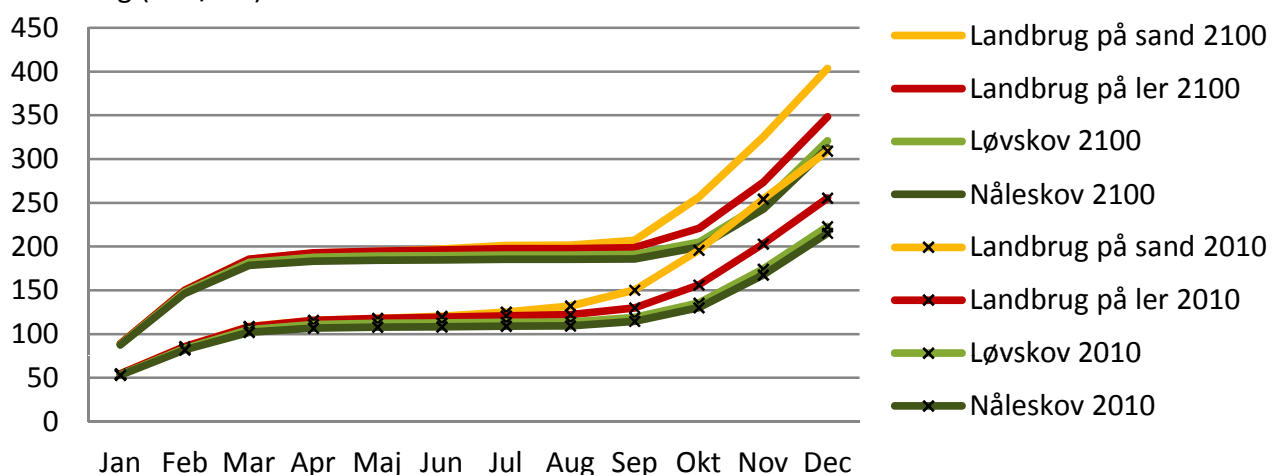
En beregning af nedsvivningen skulle gerne indikere hvor store mængder vand, som når grundvandet og efterfølgende indgå i drikkevandsressourcen. Afstrømning til vandløb fra den umættede zone medfører dog, at grundvandsdannelsen er mindre end nedsvivningen fra rodzonen. Afstrømningen kan forekomme naturligt

eller ved udlægning af dræn. I modelsimuleringen af nedsvivningen fra de fire arealtyper tages der ikke højde for udlagte dræn under landbrugsjord. Drænrør er oftest benyttet på lerjorde og den reelle grundvandsdannelse under landbrug på lerjorde kan derfor forventes at være væsentligt lavere end grundvandsdannelse under landbrug på sandjorde. Ved omlægning fra landbrug til skov forventes det, at vedligeholdelsen af drænrørene ophører samt at trærodterne på sigt tilstopper drænrørene (Trier, 2003). Drænrør forventes derfor ikke at påvirke vandbalancen på skov.

Ud over indvirkninger på grundvandsdannelsen, har ændringer arealanvendelsen også indflydelse af udvaskning af nitrat til grundvandet. Nitratudvaskning er størst fra landbrugsarealer, hvor der tilføjes gødning på markerne (Ladekarl, 2003). Nedbrydningen af kvælstof finder sted over en længere periode og i efterårsperioden vil der på marker uden afgrøder, stadig frigøres nitrat så længe temperaturen er høj nok. I denne periode øges nedbørmængden også, og derfor er nitratudvaskningen størst her (Petersen, 1994: 96). Under den fremtidige klimaperiode forventes større nedbørmængder i efteråret samt temperaturstigninger, hvilket potentielt kunne medvirke til, at nitratudvaskningen kan blive større og foregå over en længere periode. De samme klimaændringer vil dog formodentlig også medvirke til en længere dyrkningssæson med øget brug af efterårsafgrøder og på baggrund af denne antagelse, vil perioden med høj nitratudvaskning nærmere forskubbes end forstørres.

De sæsonmæssige variationer er et udtryk for de klimatiske forskelle i løbet af året. På landbrug har forvaltningen af jorden dog også en indflydelse på de månedlige variationer i nedsvivningen. I mere komplekse modeller så som Daisy modellen, er der mulighed for at inkludere afgrøders udvikling og påvirkning på nedsvivningen. Som nævnt i kapitel 2.4 kan der ud fra brug af Daisy modellen, forventes viser mere nedsviv-

Nedsvivning (mm/md)



Figur 4.7: Akkumuleret nedsvivning i mm/md for klimaperioderne 1989-2010 (markeret 2010) og 2071-2100 (markeret 2100).

ning om foråret og mindre nedsvivning om efteråret end vist ved brug af rodzonemodulet. Denne forskel er dog beregnet på sandede landbrugsjorde hvor der ikke er plantet skov, og derfor henvender den sig primært til beregninger af nedsvivning fra landbrug på sandjord. De forholdsvis store forskelle i efterårsmånederne mellem nedsvivningen fra landbrug på sandjord og de tre resterende arealtyper (se figur 4.2) kan derfor formodes at være overestimeret, mens de små forskelle i forårsperioden kan forventes at være underestimeret.

Den rumlige variation af nedsvivningen kan bidrage til en vurdering af hvilke områder, der oplever de største og mindste bidrag til grundvandsdannelsen. Som tidligere nævnt varierer den rumlige fordeling af nedsvivningen for de fire arealtyper ikke for de to klimaperioder. Dette skyldes at beregningerne af de fremtidige klimadata er de samme for hver gridcelle. Den rumlige fordeling i sommerperioden fordeler sig anderledes end den rumlige fordeling i vinterperioden. Da nedsvivningen i sommerperioden udgør en meget lille del af den totale nedsvivning, er det relevant at fokusere på de rumlige variationer i nedsvivningen i vinterperioden.

I dette studie er den rumlige variation for hver enkel arealtype, udelukkende påvirket af de klimatiske data. Det betyder at lokale faktorer så som hældning, afstrømning, den specifikke jordartssammensætning mm. Kortene over den rumlige variation af nedsvivningen er derfor bedst anvendt til at vise generelle tendenser i den rumlige variation, og ikke som et udtryk for den aktuelle forskel mellem lokaliteter.

Forskelle i den rumlige variation mellem arealtyperne vil blive diskuteret yderligere i diskussionsafsnittet om ændringer i nedsvivning ved skovrejsning (se afsnit 4.2.1).

## 4.2. ÆNDRINGER I NEDSVIVNING VED SKOVREJSNING

Dette afsnit har til formål at klarlægge hvorledes skovrejsning med løv- og nåleskov på landbrug med sandjord påvirker nedsvivningen i Region Nordjylland. Her analyseres de rumlige variationer ved omlægning af landbrug på sandjord til løvskov eller nåleskov. Efterfølgende undersøges ændringen i den samlede nedsvivning ved skovrejsning på de arealer som er udpeget til ønsket skovrejsning. Da områder med ønsket skovrejsning primært ligger på sandede landbrugsjorde, vil der i dette afsnit ses bort fra landbrug på lerjord. I afsnittet beskrives *landbrug på sandjord* derfor blot som *landbrug*.

### *Difference i nedsvivning ved omlægning af skov på landbrugsjorde*

Figur 4.8 viser den procentvise difference i nedsvivning fra landbrug til løv- og nåleskov for de to klimaperioder. Det antages at differencen mellem landbrug og skov i et gridområde, svarer til ændringen i nedsvivningen ved omlægning af landbrug til skov indenfor dette grid. Den rumlige variation er størst i den nuværende klimaperiode og ved ændring fra landbrug til nåleskov. Her varierer den rumlige forskel i nedsvivningen mellem 22 og 39 % svarende til en forskel på 85 mm/år hvor ændringen er lavet og 99 mm/år hvor ændringen er højest. I alle fire tilfælde, er differencen størst langs østkysten omkring og syd for Limfjorden. Den laveste difference ses i de vestligste egne. Ved sammenligning med de klimatiske kort i bilag 1 ses, at det mønster, som tegner sig på de fire kort i figur 4.8, kan genfindes i de rumlige variationer af nedbøren (de rumlige variationer forventes at være de samme i den fremtidige klimaperiode). Hvor nedbøren er stor, ses en lav difference mellem landbrug og skov, mens områder med relativ lav nedbør oplever de største differencer. Disse sammenhænge skyldes, at nedsvivningen er et resultat af nedbør minus den aktuelle evapotranspiration. Når nedbøren er stor, bliver forskelle i den aktuelle fordampning mindre betydelig, mens en lille nedbørsmængde fremhæver forskelle mellem de fire arealtypers værdier for den aktuelle fordampning.

Kortene over de procentvise differencer i nedsvivningen giver et overordnet billede af de tendenser, der kan forventes ved skovrejsning på forskellige lokaliteter i Region Nordjylland. For at opnå et mere reelt billede af hvor stor en nedsvivningsmængde der er tale om, vil der i det følgende fremvises forskelle i den samlede nedsvivning for de af Region Nordjylland udpegede skovrejsningsområder.

### *Ændring i nedsvivning ved skovrejsning på ønskede skovrejsningsarealer*

Den samlede nedsvivning for et ønsket skovrejsningsareal udregnes ved at multiplicere den årlige nedsvivningsmængde med skovrejsningsarealet. Der anvendes den nedsvivningsmængde, som er beregnet for den gridcelle hvori hele eller dele af skovrejsningsarealet ligger. På figur 4.9 er differencen mellem nedsvivning fra landbrug og hhv. løvskov og nåleskov vist. Fremvisning af differencer på de større arealer er blevet prioriteret under fremstillingen af de 13 værdiklasser i signaturforklaringen.

Den samlede nedsvivning fra skovrejsningsarealerne varierer fra knap 100 m<sup>3</sup>/år på det mindste areal (900m<sup>2</sup>) til omkring 3,5 mio. m<sup>3</sup>/år på det største areal (20 km<sup>2</sup>). Differencen fra landbrug til skov er størst i den nuværende klimaperiode, hvilket også blev vist i det forrige



afsnit. På det største areal er differencen i den samlede nedsivning fra landbrug til løv- og nåleskov på hhv. 1,12 og 1,21 mio. m<sup>3</sup>/år i den nuværende periode og 1,07 og 1,17 mio. m<sup>3</sup>/år i den fremtidige klimaperiode. I 2009 brugte en person i husholdningen gennemsnitlig 41,4 m<sup>3</sup> vand pr. år (Reschefskl, 2010). Med udgangspunkt i værdierne for det største areal på 20km<sup>2</sup>, vil en ændring i nedsivning fra landbrug til skov på omkring 1,1 mio. m<sup>3</sup>/år, svare til knap 27.000 personers brug i husholdningen pr. år. Forskellen mellem beplantning af nåleskov eller løvskov på omkring 95.000 mm/år for begge klimaperioder svarer til knap 2.300 personers brug i husholdningen pr. år. Det er dog vigtigt at påpege, at der ikke direkte kan sættes lighedstegn mellem nedsivning og den mængde drikkevand der er tilgængeligt. Som nævnt i afsnit 4.1, kan dele af de vandmængder, der nedsiver fra rodzonen efterfølgende afstrømme til søer og vandløb inden de når grundvandet. Desuden kan nedsivningen ende i grundvandsreservoirer, der af flere grunde ikke oppumpes til drikkevand. Derfor formodes det at sammenligningen mellem nedsivning og husholdningsforbrug er overestimeret. Sammenligningen giver dog en indikation af i hvilke størrelsesordner der opereres.

#### 4.2.6. DISKUSSION AF ÆNDRINGER I NEDSIVNING VED SKOVREJSNING

Nogle af de forhold, der skal tages højde for ved sammenligning af resultater af nedsivningen fra de fire arealstyper, er allerede beskrevet og diskuteret i afsnit 4.1, og vil derfor ikke gentages i dette afsnit.

Ved skovrejsning forventes et fald i nedsivningen på op mod 100 mm/år. Afhængig af størrelsen på skovrejsningsarealet, kan det have en betydelig effekt på grundvandsdannelsen (givet at størstedelen af nedsivningen når grundvandet). Effekten af skovregning på nedsivningen er størst i de østligste egne af Region Nordjylland, hvor nedsivningen i forvejen er lav og lavest i de vestligste egne. Forskellen mellem skovrejsning på i den østlige og vestlige del er dog højst på omkring 15 mm/år. Som følge af anvendelsen af en forsimplede beregningsmodel, og at flere rumlige faktorer ikke er inkluderet i beregningerne, er det svært at drage en konklusion om, hvorvidt de rumlige forskelle i nedsivningen afspejler virkeligheden, og er i en størrelsesorden af betydelig karakter.

Ændringerne i den samlede nedsivning fra landbrug til skov viser, at skovrejsning på de større ønskede skovrejsningsområder er af betydelig størrelse. I Danmark indvindes der årligt omkring 4 mio. m<sup>3</sup> vand (Jørgensen, 2005) En nedsivning på 3,5 mio. m<sup>3</sup> fra det største skovrejsningsareal svarer således til 0,9 % af den sam-

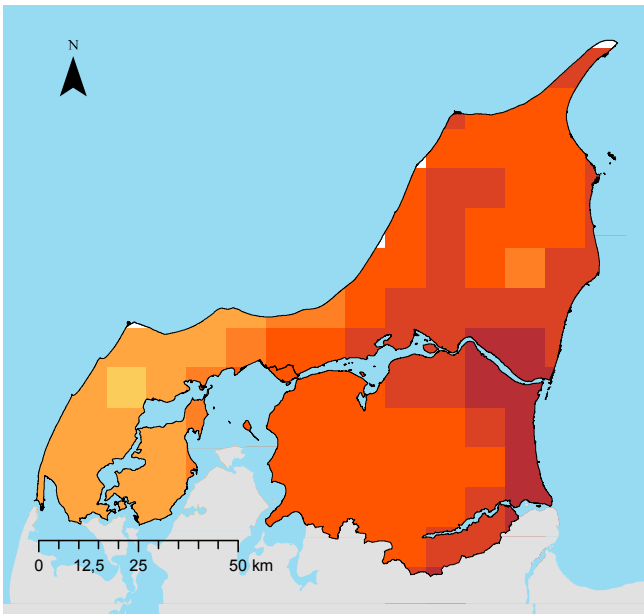
lede indvindingsmængde, hvis altså al nedsivningen når grundvandet.

Det formodes at den estimerede nedsivning fra nåleskov er sat for højt, da empiriske studier af nedsivning fra nåleskov viser en nedsivning fra nåleskov, som er 100 mm/år lavere end den fra løvskov, og 200 mm/år lavere end den fra landbrug (se figur 2.2.). Havde det været muligt at modelberegne en større forskel mellem landbrug og nåleskov, ville ændringen i nedsivning ved skovrejsning med nåleskov da også være større. Det ville have bidraget til en diskussion om hvilken betydning valg af skovtype har for nedsivningen. Som resultatet af beregningerne fra denne rapport, må det konkluderes at skovrejsning med nåleskov vil bidrage til et større tab i nedsivningen end fra løvskov, men resultaterne formodes at være en grov underestimeret af den reelle forskel.

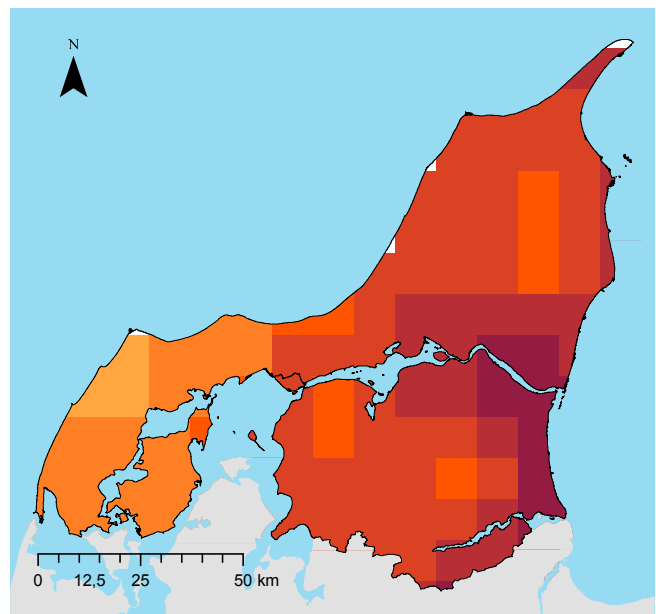
Generelt kan den rumlige visualisering af nedsivningen fra forskellige arealstyper, indikere hvor beplantning af ny skov påvirker nedsivningen mest og mindst. De fremstillede kort kan derfor indgå som redskab til at synliggøre fordele og ulemper ved skovrejsning under en udpegelsesproces af den geografiske placering af skov på landbrugsjord. Dog kræves der en mere detaljeret beregning af de rumlige forskelle i nedsivningen, for at kunne beskrive hvilken forskel der reelt forekommer ved skovrejsning på forskellige lokaliteter.

De fleste ønskede skovrejsningsområder er placeret på nitratfølsomme indvindingsområder (se figur 3.3) og dette er specielt relevant for de større skovrejsningsarealer, hvor muligheden for en stor reduktion af nitratudvaskning kan finde sted. Yderligere ses det af at flere af de store skovrejsningsarealer er placeret nær byområder og her vil skovrejsningen bidrage til sociale formål.

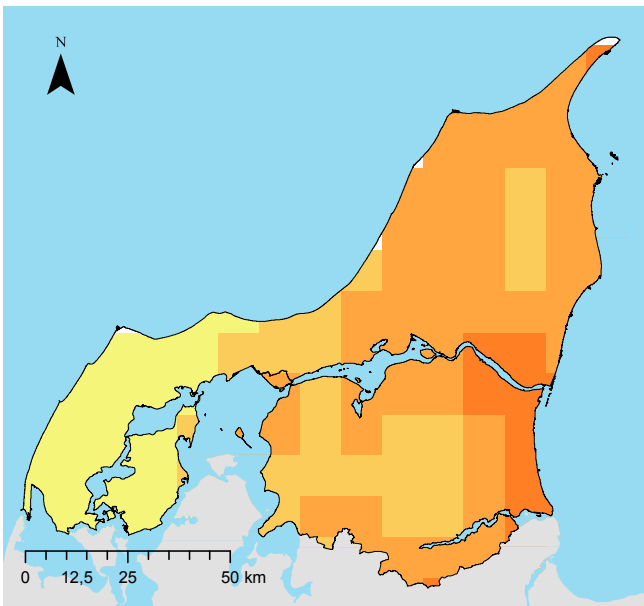
Der er en lang række forhold, som har indflydelse på prioriteringen af et skovrejsningsområde. Hertil hører både miljømæssige og sociale forhold. De rumlige variationer i nedsivning, får først en betydelig indflydelse på prioriteringen af skovrejsning, når arealet der omlægges til skov er stå stort, at det vil have en negativ indvirkning på grundvandsdannelsen, der vægtes højere fordelene. Hvornår denne betydelig negative indvirkning indtræder, er afhængig af hvor stor en tilgængelig drikkevandsressource der er til rådighed nu og i fremtiden. Selv om Region Nordjylland har en forholdsvis høj grundvandsdannelse, kan forurening af grundvandet muligvis begrænse mængden af indvindingsområder. Det er derfor muligt af forskelle i nedsivningen på længere sigt vil højere betydning i vægtningen af fordele og ulemper ved skovrejsning.



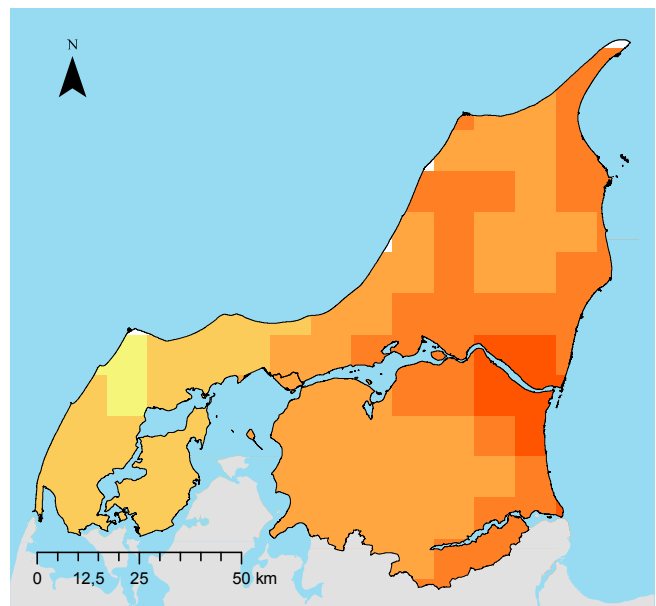
A: Difference mellem landbrug og løvskov, 1989-2010.



B: Difference mellem landbrug og nåleskov, 1989-2010.

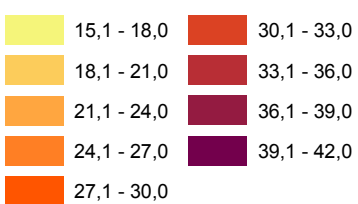


C: Difference mellem landbrug og løvskov, 2071-2100.

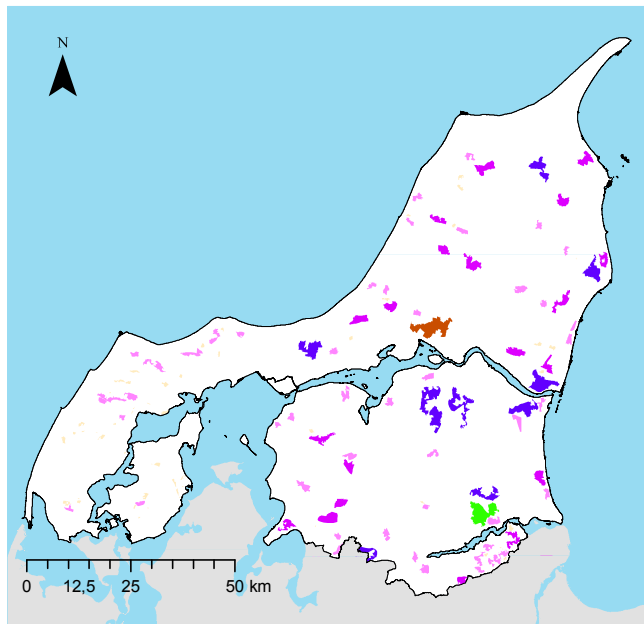


D: Difference mellem landbrug og nåleskov, 2071-2100.

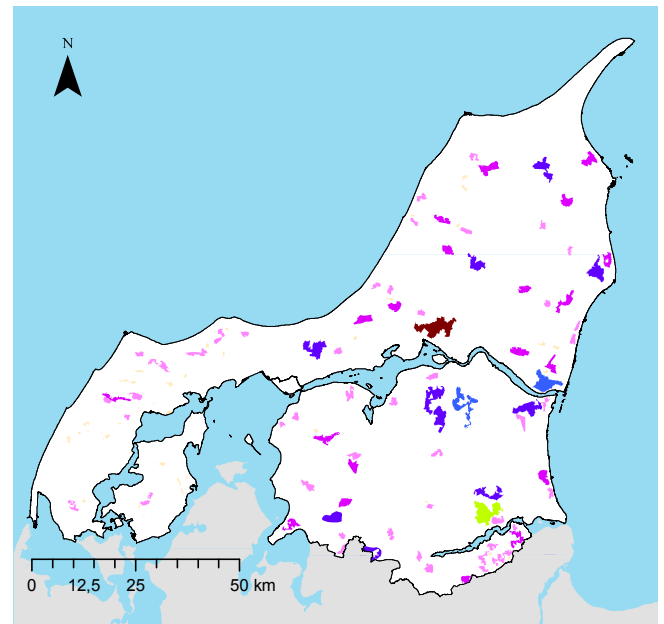
Negativ ændring i nedsvivning, [%]



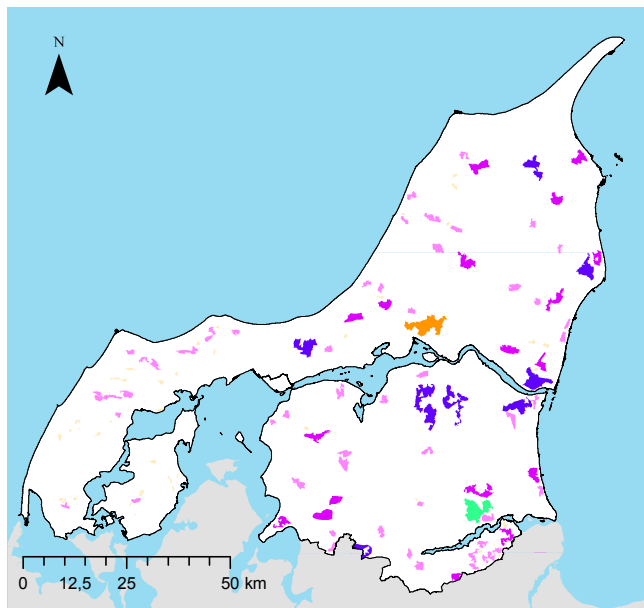
Figur 4.8: Procentvise difference i nedsvivning fra landbrug på sandjord til løvskov (a og c) og nåleskov (b og d). Differencen er vist for perioden 1989-2010 (a og b) og perioden 2071-2100 (c og d).



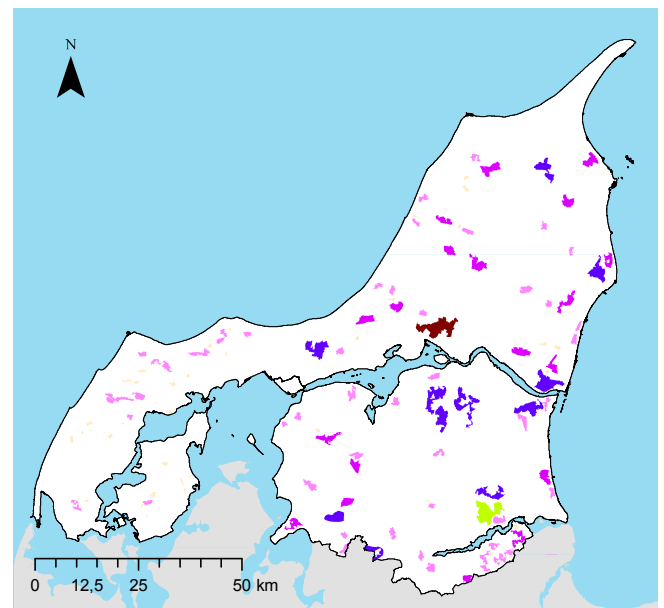
A: Ændring mellem landbrug på sandjord til løvskov, 1989-2010.



B: Ændring mellem landbrug på sandjord til nåleskov, 1989-2010.

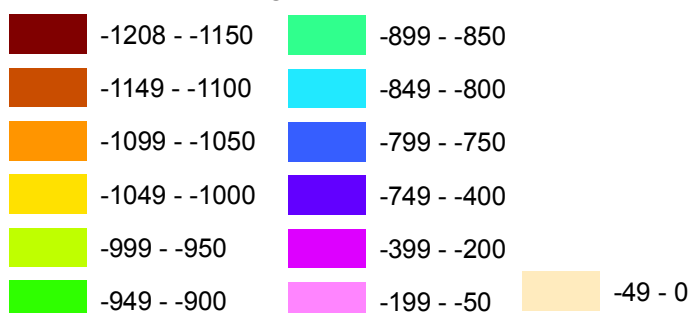


C: Ændring mellem landbrug på sandjord til løvskov, 2071-2100.



D: Ændring mellem landbrug på sandjord til nåleskov, 2071-2100

Difference i nedsvivning, [1000 m<sup>3</sup>/år]



Figur 4.9: Differencen i samlet nedsvivning mellem landbrug og løvskov i perioden 1989-2010 (a), landbrug og nåleskov i perioden 1989-2010 (b), landbrug og løvskov i perioden 2071-2100 (c) og landbrug og nåleskov i perioden 2071-2100 (d).

## 5. KONKLUSION

Analysen af den rumlige variation i nedsivningen viser, at nedsivningen regionalt svinger med 150 mm/år. Den rumlige variation af nedsivningen for hver enkelt arealtype er et udtryk for de rumlige variationer i de klimatiske data, og specielt styret af nedbørsfordelingen. Ønskes en større detaljegråd af den rumlige variation af nedsivningen, kræver det lokalspecifikke informationer om hver enkelt arealtypes placering og jordbundsforhold. Den fremviste rumlige variation i nedsivningen kan dog på regional skala give et overblik over hvilke forskelle i nedsivningen der kan forventes ved at have skov plantet i forskellige egne af region Nordjylland.

På baggrund af analysen af forskelle i nedsivningen for landbrug på sandjord, landbrug på lerjord, løvskov og nåleskov, ses det at der er i begge klimaperioder er signifikante forskelle i nedsivningen på årsbasis og månedsbasis med undtagelse af nogle enkelte måneder internt mellem de forskellige landbrugstyper og skovtyper. Nedsivningen fra hver arealtype er også signifikant større i den fremtidige klimaperiode. Nedsivningen er størst for landbrug med sandjord, efterfulgt af land-

brug med lerjord. Den laveste nedsivning er fra nåleskov. Det var og forventet at nedsivning fra nåleskov ville være betydeligt lavere end de beregnede værdier. I fremtidige studier foreslås derfor brug af en større afgrødekoefficient for nåleskov eller andre metoder til fremhævelse af forskelle i træsorter.

Ved omlægning af landbrugsarealer til skov på udpegede skovrejsningsarealer kan der forventes mindskning i nedsivningen svarende til flere tusinder personers årlige forbrug i husstanden. En vurdering af hvorvidt dette reelt er et problem for drikkevandsressourcerne i Region Nordjylland er ikke inkluderet i projektet, omend det vil være relevant.

Fremtidige klimaændringer bidrager til en stigning i nedsivningen på 25-30 % hvilket betyder, at den nuværende nedsivning fra landbrug på sandjorde er den sammen som den fremtidige nedsivning fra skov. En ændring i arealanvendelsen fra landbrug på sandjord til skov vil således medfører, at nedsivningen på lang sigt ender ud med at være den samme som før skovrejsningen. Nedsivningen reduceres dog indtil klimaændringerne nærmer sig det niveau, der forventes under IPCC's A2-klimascenarie. Laves undersøgelsen med udgangspunkt i andre klimascenarier, opnås muligvis nogle andre konklusioner. I en udvidelse af dette studie vil det derfor være relevant, at undersøge forholdene under andre klimascenarier.

## 1. PERSPEKTIVERING

Baseret på de erfaringer, som er optaget gennem dette studie, vil der i dette kapitel gives nogle alternativer til hvorledes problemformuleringen kan besvares samt kommer med forslag til andre perspektiver, som kunne være relevante at undersøge for ændringer i nedsivningen ved skovrejsning.

Det manglende kendskab til hydrologisk modellering inden dette studie påbegyndtes, har ført til valget af et simpel rodzonemodul til beregning af nedsivning. Brugen af rodzonemodulet har bidraget til logisk forståelse af de dynamikker, som påvirker nedsivningen fra rodzonen. I et fremtidigt studie af denne karakter, kan der dog foreslås en mere kompleks vandbalance-model, som kan inddrage flere lokalspecifikke oplysninger om de arealer der ønskes undersøgt.

Under analysen af nedsivning fra nåleskov sås en nedsivning, der var så forskellige fra andre studier af ned-

sivning fra nåleskov. Det konkluderes deraf, at valg af afgrødekoefficient for nåleskov burde genovervejes. For at undgå denne situation, kan der med fordel testes brugen af en række afgrødekoefficienter, for derefter at benytte den afgrødekoefficient, som er bedst tilpasset den forventede nedsivning.

Den mindskede nedsivning til grundvandet ved omlægning af landbrugsarealer til skov er en af de negative konsekvenser ved skovrejsning. Andre negative konsekvenser kan fx være økonomiske tab ved nedlægning af landbrugsbedrifter. Ved omlægning til skov er der dog også en lang række fordele så som renere grundvand, øgede habitater og korridorer til gode for biodiversiteten samt samfundsmæssige goder i form af rekreative områder. I et fremtidigt studie kunne det være interessant, at undersøge hvorledes fordele og ulemper ved skovrejsning vægtes. Dette kan undersøges ud fra en rumlig tilgang, hvor faktorer så som nærhed til andre skove, placering i henhold til nitratfølsomme indvindingsområder, størrelsen af skovrejsningsarealer inddrages.

### *Forfatterens tak til bidragydere*

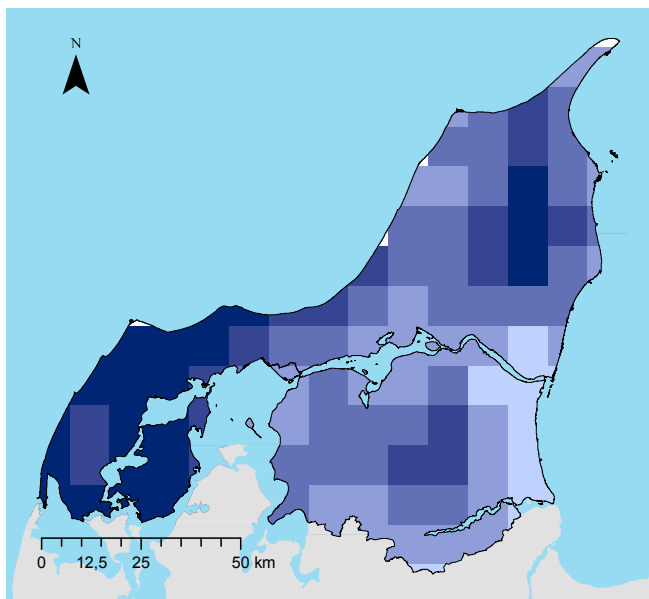
Først og fremmest skyldes tak til min vejleder Eva Ritter fra AAU og eksterne vejleder Bernd Munier fra DMU. Et stort tak skyldes også til Hans Jørgen Henriksen og Britt Christensen fra GEUS, som har hjulpet med opstillingen af rodzonemodulet og bidraget med gode råd og vejledning. Sidst en tak til medarbejderne på systemanalyseafdelingen på DMU for, at dele deres dagligdag med mig og ligeledes komme med gode råd og vejledning til specialeafhandlingen.

## 2. REFERENCELISTE

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- Bahrenscheer, M. G. & Mortensen, B., Arleth, M., Grønkjær, P., ukendt år. *Klimascenarier*. Lokaliseret på world wide web: [www.rn.dk](http://www.rn.dk).
- Bastrup-Birk, A., Gundersen, P., & Hansen, K., 2003. Nedsivning til grundvand under skove. I: *Grundvand fra skove - muligheder og problemer*. Raulund-Rasmussen, K. & Hansen, K. (eds.). Skovbrugsserien nr. 34, *Skov & Landskab*, Hørsholm.
- Christensen, B.S.B. & Henriksen, H.J. 2000: *Test af DK-modellens rodzonemodul*. Lokaliseret d. 1. jun. 2011 på [www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk), Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse.
- DMI, 2011: Data stammer fra DMI Novana og er benyttet i specialet gennem tilladelse fra DMU.
- DMU, 2011. Tilladelse af DMU (Bernd Munier) til brug af GIS data fra DMU's database.
- ESRI, 2007. ArcGIS Desktop Help 9.2 – Natural breaks (Jenks). ONLINE. Lokaliseret d. 19. sep.2011 på: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural\\_breaks\\_%28jenks%29](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_%28jenks%29)
- Feddes, R.A., Koopmans, R.W.R. and van Dam, J.C., 1999. *Agrohydrology*. Department of Water Resources, Wageningen University.
- GEUS, 2011: Data og modelopstillinger til brug i rapporten er videregivet af Hans Jørgen Henriksen og Britt Christensen fra GEUS.
- Gundersen, P. & Bastrup-Birk, A., 2003. Skove ændrer vandkredsløbet. *Vand & Jord*, 2003(4), s. 132-135.
- Gundersen, P., Friis, E. og Hansen, K., 2001. *Nitratudvaskning fra skovrejsning og vedvarende græsarealer 1998-2001 – Drastrup projektet*. Aalborg Kommune og Forskningscenter for Skov og Landskab.
- Hansen, K. (red.), 2003. Næringsstofkredsløb i skove – Ionbalanceprojekt. *Forest & Landscape Research*, No. 33-2003. Danish Forest and Landscape Research Institute, Hørsholm.
- Hansen, S., 2002. *Daisy, a flexible soil-plant-atmosphere system model*. Lokaliseret d. 2. aug. 2011 på: <http://www.dina.kvl.dk/~daisy/ftp/DaisyDescription.doc>
- Henriksen, H.J., Sonnenborg, A., 2003. *Ferskvandets kredsløb*, Nova2003 Temarapport, 228p, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København.
- Højberg, A. L., Ondracek, M., Nyegaard, P., Troldborg, L., Stisen, S., Christensen, B. S. B., 2010. *DK-model2009 - Modelopstilling og kalibrering for Nordjylland*. GEUS rapport 2010/79, København.
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jansson, P. E. & L. Karlberg. 2001. *Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere Systems*. Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Engineering.
- Jensen, C. L., Kirkebæk, M., Poulsen, L. B., Rasmussen, S., Rudfeldt, L., Villumsen, B., Wieth-Knudsen, L., Winther, H., 1999. *Planlægning af skovrejsning - en vejledning til amternes regionplanlægning*. Skov og Naturstyrelsen. Lokaliseret d. 2. aug. 2011 på <http://www2.sns.dk/skov/vejplanl.htm>

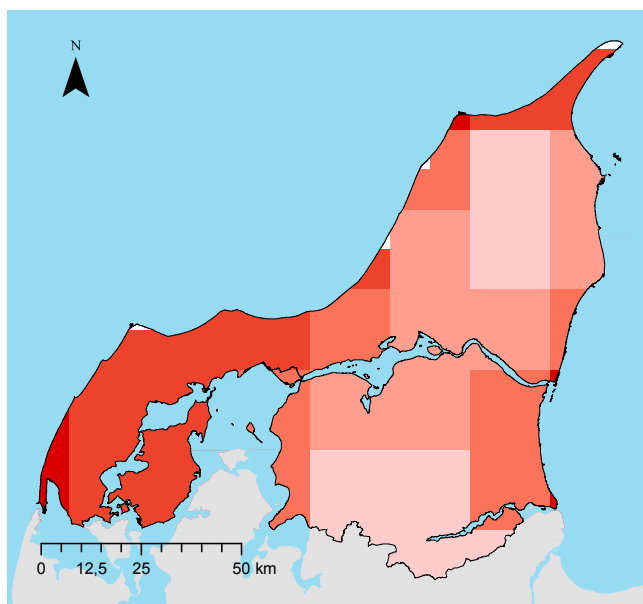
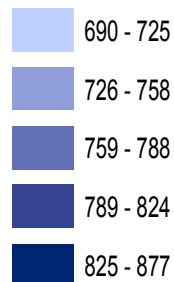
- Jørgensen, L. F., 2005. *Grundvand 2004. Status og udvikling 1989-2004*. GEUS, 2005. Lokaliseret d. 3. okt. 2011 på [http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/1989\\_2004/grundvandsressourcen/v02.html](http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/1989_2004/grundvandsressourcen/v02.html)
- Kirkebæk, M. & Thormann, A., 2000. *Evaluering af den gennemførte skovrejsning 1989-1998*. Skov- og Naturstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet.
- Ladekarl, U. L., 2005. Skovrejsning og grundvandsdannelse. *Vand & Jord*, 2005(4), s. 128-131.
- Ladekarl, U. L., Beier, C., Dellwik, E., 2005. Fordampning fra landbrug og skov. *Vand & Jord*, 2005(2), s. 44-47.
- Ladekarl, U.L., 2003. *Mængde og kvalitet af grundvandsdannelsen under nye og etablerede skove*. Vandforsyningsteknik nr. 52, s 13-26.
- Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen, 2010. *Handlingsplan til sikring af drikkevandskvaliteten 2010-2012. Øget sikkerhed. Større ressourcebevidsthed. Bedre teknologi*. Miljø- og Planlægnings-udvalget 2010-11. MPU alm. Del. Bilag 184. <http://www.ft.dk/samling/20101/almDel/mpu/bilag/184/925343.pdf>
- Per Gundersen og Rita M. Buttenschøn (2005): Vegetationsudvikling og nitratudvaskning ved ændret arealanvendelse – eng, overdrev og skovrejsning i Drastrupprojektet 1998-2005, Aalborg Kommune og *Skov & Landskab, Arbejdsrapporter Skov & Landskab Nr.: 24*, 2005.
- Petersen, L., 1994. *Grundtræk af jordbundslæren*. - 4. reviderede og udvidede udgave. Frederiksberg: Jordbrugsforlaget
- Plauborg, F., Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Blicher-Mathiesen, G. og Kern-Hansen, C., 2002. *Vandbalance på mark og oplandsskala*. DJF rapport 70. Danmarks Jordbrugs-Forskning.
- Reschefskl. L., 2010. *Vand i tal*. Danva, Skanderborg. Lokaliseret d. 14. okt. 2011 på: [www.danva.dk](http://www.danva.dk).
- Sonnenborg, T. O. & Henriksen, H.J. (eds), 2005. *Håndbog i grundvandsmodellering*, GEUS rapport 2005/80, Kap. 6.
- Sonnenborg, T., Christensen, B. & Van Roosmalen, L., 2007. Klimaændringer - påvirkning af grundvand og vandløb. *Geologisk Nyt*. Lokaliseret d. 20. jun. 2011 på: <http://ojs.statsbiblioteket.dk/index.php/gn/article/view/3368>.
- Sonnenborg, T.O., Christensen, B.S.B., van Roosmalen, L., & Henriksen, H.J., 2006. *Klimaændringers betydning for vandkredsløbet i Danmark*. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Rapport 2006/22
- Sonnenborg, T.O., Gundersen, P. & Refsgaard, J.C., 2008. *Sammenligning af vandbalancer for mark og løvskov tre steder på Sjælland. Hvordan påvirker skovrejsning med løvtræer grundvandsdannelsen kvantitativt på lerjorder?* Rapport udarbejdet for Skov- og Naturstyrelsen.
- Trier, L., Leth-Espensen, J., Vangsgård, C., Vangsgård, S. & Jørgensen, K., 2003. *Skovrejsning og Grundvand*. Miljøministeriet, Skov- og Naturstyrelsen. ISBN 87-7279-493-3. Skov- og Naturstyrelsen
- Van Roosmalen, L., Christensen J. H., Butts M., Jensen K. H., Refsgaard J.C., 2009. Quantifying climate change signals for Denmark and assessing the robustness for hydrological impact studies. *Journal of Hydrology*, Publisert online, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.014>.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Keying, Y., 2007. *Probability & Statistics for Engineers and Scientists*, Pearson Prentice Hall, ISBN:0-13-204767-5.
- Aalborg Kommune, 2010. *Grøn-blå struktur*. Aalborg Kommune. Lokaliseret d. 1. jun. 2011 på [www.rm.dk](http://www.rm.dk)

# BILAG 1



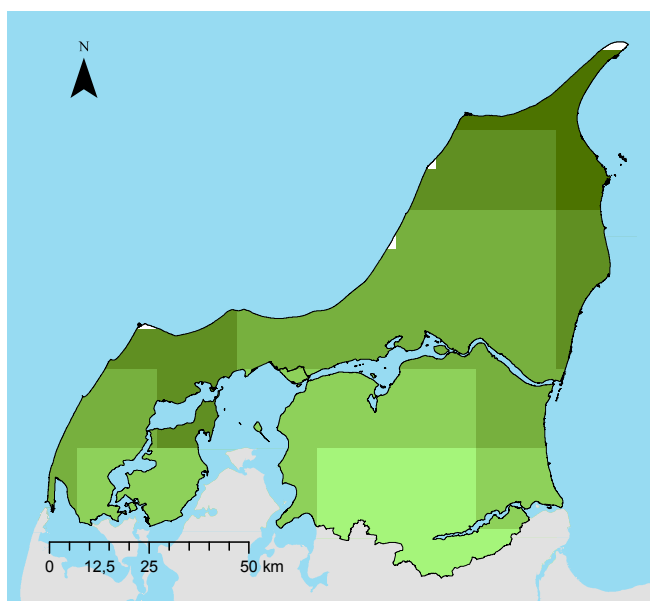
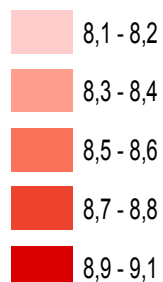
A: Årlige nedbørsmængder i perioden 1989-2010. Data hentet fra DMI (2011).

Nedbør (mm/år)



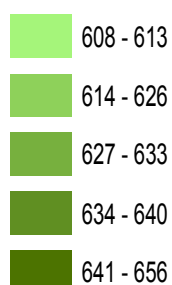
B: Gennemsnitlige temperaturer i perioden 1989-2010. Data hentet fra DMI (2011).

Temperatur (°C)



C: Reference-evapotranspiration ( $ET_{ref}$ ) for perioden 1989-2010. Data hentet fra DMI (2011).

$ET_{ref}$  (mm/år)





## BILAG 2

Dansk JordbrugsForsknings jordklassifisering af pløjelagets tekstur. Den sidste kolonne viser inddeling af jordtyper i *sandet jord* og *leret jord* (efter tabel fra DJF lokaliseret den 1. okt. 2011 på <http://www.djfgeodata.dk/datasaml/jord2.html>)

Jordtype	Teksturdefinition for jordtype	JB-nr	Vægtprocent					Omklassifisering af jordtype
			Ler under 2 µm	Silt 2-20 µm	Finsand 20-200 µm	Sand, ialt 20-2000 µm	Humus 58.7% C	
1	Grovsandet jord	1	0-5	0-20	0-50	75-100	Under 10	Sandet jord
2	Finsandet jord	2			50-100			
3	Grov lerblandet sandjord	3	5-10	0-25	0-40	65-95		
	Fin lerblandet sandjord	4			40-95			
4	Grov sandblandet lerjord	5	10-15	0-30	0-40	55-90		
	Fin sandblandet lerjord	6			40-95			
5	Lerjord	7	15-25	0-35		40-85		
6	Svær lerjord	8	25-45	0-45		10-75		
	Meget svær lerjord	9	45-100	0-50		0-55		
	Siltjord	10	0-50	20-100		0-80		
7	Humus	11					Over 10	
8	Speciel jordtype	12						