

Kapitel 6. Ferskvandets kredsløb og tidslige variationer

Jens Christian Refsgaard, GEUS

Claus Kern-Hansen, DMI

Finn Plauborg, DJF

Niels Bering Ovesen, DMU

Per Rasmussen, GEUS

KAPITEL 6. FERSKVANDETS KREDSLØB OG TIDSLIGE VARIATIONER..... 1

6.1	KAPITEL SAMMENFATNING	2
6.2	NETTONEDBØR OG VANDBALANCE	4
6.2.1	<i>Vandets kredsløb</i>	4
6.2.2	<i>Processer og definitioner – vandbevægelse over jorden</i>	5
6.2.3	<i>Processer og definitioner – umættet zone</i>	6
6.2.4	<i>Processer og definitioner – mættet zone</i>	7
6.2.5	<i>Udveksling mellem grundvand og vandløb</i>	8
6.2.6	<i>Vandbalanceligningen</i>	8
6.2.7	<i>Tidligere opgørelser af vandbalancen</i>	9
6.2.8	<i>Usikkerheder på de enkelte komponenter i vandbalancen</i>	11
6.3	NEDBØR	13
6.3.1	<i>Metoder til måling af nedbør</i>	13
6.3.2	<i>Nedbørkorrektio n (læforhold, wetting, flydende/fast nedbør mv.)</i>	14
6.3.3	<i>Tidslig variation i nedbør 1991-2000 / 1961-1990</i>	17
6.4	FORDAMPNING	21
6.4.1	<i>Måling af fordampning</i>	21
6.4.2	<i>Måling af klimaparametre til beregning af reference fordampning efter Penman</i>	21
6.4.3	<i>Bestemmelse af referencefordampning (ET₀) og afgrødekoefficienter</i>	22
6.4.4	<i>Fordampning fra mark, skov og vådområder</i>	24
6.4.5	<i>Tidslig variation i referencefordampning 1991-2000 / 1961-1990</i>	28
6.4.5	<i>Usikkerhed på fordampning</i>	28
6.5	AFSTRØMNINGSDATA	31
6.5.1	<i>Måling af afstrømning</i>	31
6.5.2	<i>Karakteristiske størrelser for afstrømningen</i>	31
6.5.3	<i>Betydning af medianminimumafstrømning og variation for økologiske forhold</i>	32
6.5.4	<i>Tidslige variationer i afstrømning for 1991-2000 / 1961-1990</i>	32
6.5.5	<i>Usikkerhed på afstrømningsmålinger</i>	34
6.6	VANDSPEJLSVARIATIONER I GRUNDVAND	36
6.6.1	<i>Måling af grundvandstand i det nationale pejlestationsnet</i>	36
6.6.2	<i>Tidslig variation i grundvandsstand</i>	36
6.6.3	<i>Usikkerhed på pejeleda ta</i>	37
6.7	VANDINDVINDING	39
6.7.1	<i>Måling af oppumpede vandmængder og fordeling på enkeltboringer</i>	39
6.7.2	<i>Vandindvindingsstatistik og fordeling på forbrugskategorier</i>	39
6.7.3	<i>Den tidslige udvikling i vandforbrug til markvanding, vandværker og industri</i>	40
6.7.4	<i>Usikkerhed på vandindvindingsdata</i>	42
6.8	VURDERING AF PERIODEN 1991-2000 I FORHOLD TIL LÆNGERE TIDSSERIER	43
6.9	REFERENCER	46

Formålet med dette kapitel er at give en kortfattet metodisk beskrivelse af processer og datagrundlag som ligger til grund for vandressourceopgørelser i Danmark, samt at opridsede problemer der gennem årenes løb har været forbundet med sådanne opgørelser. Specielt lægges der vægt på at beskrive de aktuelle problemer med at få vandbalancen til at "gå op". I den forbindelse gives der også en vurdering af de væsentligste usikkerhedskilder og deres betydning.

I forbindelse med beskrivelsen af datagrundlaget gives der en illustration af den tidsmæssige variabilitet af de væsentligste variable: nedbør, referencefordampning, afstrømning, vandindvinding og grundvands trykniveau. Herunder foretages en vurdering af perioden 1991-2000, som i andre af rapportens kapitler har været benyttet til modelberegninger. Grundige statistiske analyser af data er tidligere foretaget og rapporteret af de respektive fagdatacentre, og det har ikke været rapportens opgave at gentage sådanne analyser. Derfor er den tidlige variabilitet blot illustreret ved hjælp af fire stationer for hvert af variablene nedbør, referencefordampning, afstrømning og grundvands trykniveau med særlig vægt på det samlede kredsløb. De anvendte stationer og deres placering fremgår af fig. 6.1.

Den regionale variation af specielt nedbør og referencefordampning beskrives yderligere i kapitel 7, hvor de konkrete data som er benyttet ved modelberegningerne, samt resultaterne fra vandbalanceopgørelserne med DK-modellen, er nærmere beskrevet.

6.1 Kapitel sammenfatning

Vandbalancen for et opland kan udtrykkes ved en vandbalanceligning, hvor nedbør balanceres af summen af de øvrige led i vandbalancen, dvs. aktuel fordampning, afstrømning i vandløb, underjordisk afstrømning, oppumpning til vandindvinding og ændret magasinerings i rodzonen og undergrunden. Der er betydelige usikkerheder på opgørelse af vandbalancen på oplandsbasis, anslået til +/- 50 mm/år, som følger af usikkerhederne på de enkelte led.

De nye korrektionsværdier for nedbør må anses at være behæftede med en vis usikkerhed, idet de endnu er så nye, at de ikke har været testet i vandbalancestudier eller valideret mod et større uafhængigt dansk datasæt. Det gælder især for korrektion af nedbør der falder som sne, som slår kraftigt igennem på korrektionsværdierne for vintermånederne. Selvom punktværdierne, med ovennævnte forbehold overfor korrektionsværdierne må anses for at være nøjagtige, er der desuden en betydelig usikkerhed knyttet til areal-værdier. For Susåens opland er beregnet usikkerheder på arealnedbøren af størrelsesorden 60% på daglige værdier, 10 % på månedsværdier og 6 % på årlige værdier.

De hyppigst anvendte metoder for beregning af aktuel fordampning ud fra referencefordampning har haft som forudsætning, at referencefordampningen har været et mål for den maksimale fordampning. Det har imidlertid vist sig, at de fleste afgrøder i perioder kan have en fordampning som er 10-20 % større end referencefordampningen. Det vil sige at det er nødvendigt at benytte overfladekoefficienter, som varierer med afgrøde og med årstid. Vidensgrundlaget med hensyn til hvordan forskellige afgrøder fordamper er stadig mangelfuldt. Der er en betydelig usikkerhed knyttet til estimeringen af disse koefficienter. Hertil

kommer at fordampningen for visse overfladetyper, specielt skove og vådområder, er dårligt undersøgt. Desuden sker der løbende en ændring af landbrugsafgrøderne så høstudbyttet i dag er øget med ca. 30 % indenfor få årtier (i foderenheder pr. ha). Det er ikke tilstrækkeligt belyst hvorledes dette forhold eventuelt påvirker fordampningen. Usikkerheden på aktuel fordampning er estimeret til 10 % på årsbasis.

Usikkerheden på afstrømning vurderes at være væsentligt lavere end usikkerheden på nedbør og fordampning, med usikkerheder på årsværdier på op til 5 %, og 5-10 % på daglige værdier for større oplande.

Perioden 1991-2000 indeholder betydelige korttidsvariationer i klima og nedbør med våde og tørre år, som er mere sjældne end forventelig i en tiårs periode. Der er således store variationer med et enkelt meget tørt år (1996) og tre meget våde år (1994, 1998 og 1999). Det tørre år ligger på niveau med de tørre år som optræder med en gentagelsesperiode på ca. 50 år. De tre våde år er de vådeste i hele den historiske tidsserie.

Det gennemsnitlige niveau for nedbør og afstrømning i perioden 1991-2000 er sammenlignelig med 1980'erne, en tiårsperiode med den højeste registrerede nedbør og afstrømning. Til sammenligning var nedbøren i perioden i slutningen af 1800-tallet 15 % lavere.

Vinternedbøren i perioden 1991-2000 var højere end vinternedbøren for perioden 1961-90. I det hele taget har vinternedbøren siden 1961 været højere end i tidligere årtier.

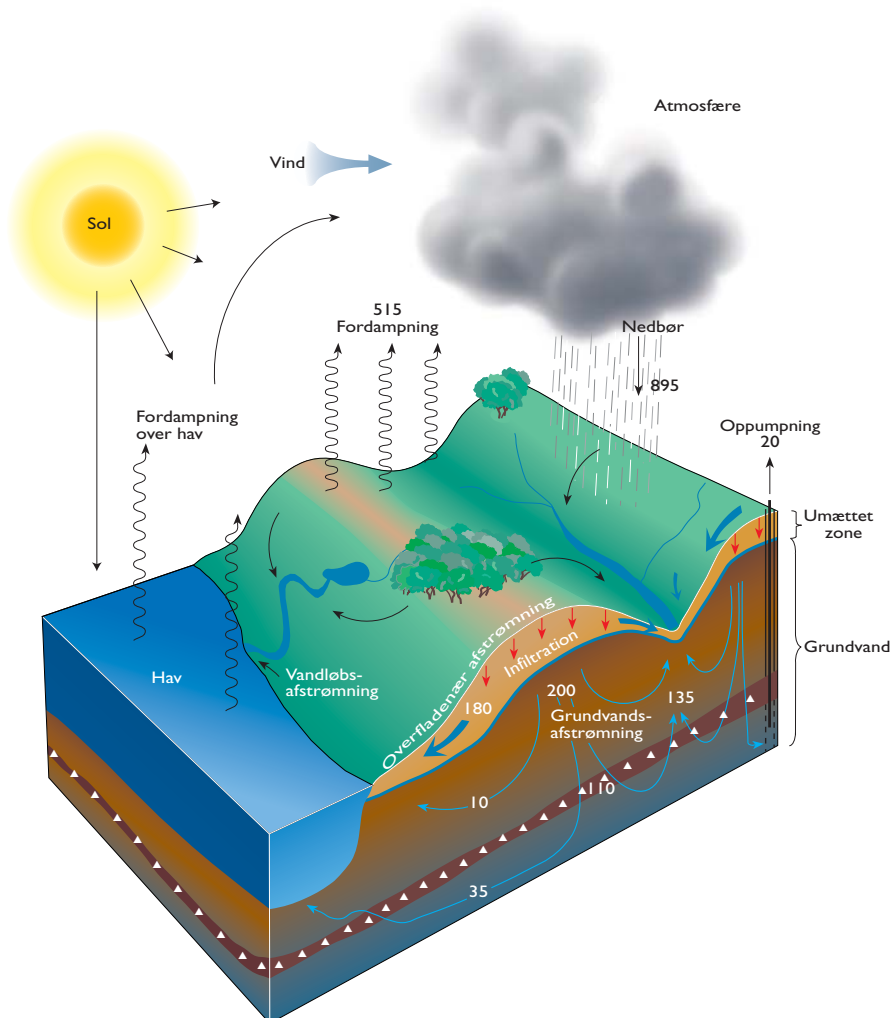


Figur 6.1 Placeringen af de stationer og oplande, hvorfra der vises resultater i kapitel 6.

6.2 Nettonedbør og vandbalance

6.2.1 Vandets kredsløb

Vandet i naturen er i stadig cirkulation (Fig. 6.2). Vandets kredsløb er en vedvarende proces der drives af solenergien og tyngdekraften. Der sker fordampning fra hav-, sø- og landområder. Vanddampene transporteres med vinden, og når de meteorologiske forhold betinger det, fortættes de og falder ned som regn eller sne. Nedbør, der falder over landområder, trænger ned i de øvre jordlag eller strømmer overfladisk af. Vandmængderne i de øvre jordlag fordamper dels direkte fra jordoverfladen og dels fra planterne eller synker ned og danner grundvand. Alt efter geologi og terræn vil en del af grundvandet nå underjordisk frem til havet, men langt den største del vil komme frem som kilder i jordoverfladen eller i bunden af søer og vandløb, og gennem vandløb føres til havet. Grundvandets bevægelse gennem jordlagene foregår normalt meget langsomt.



Figur 6.2 Det hydrologiske kredsløb med vandbalancetal i mm/år for et typisk dansk område baseret på den nationale vandressourcemodel.

Tallene i figur 6.2 er baseret på den nye opgørelse ud fra den nationale vandressourcemodel og gælder for hele landet som gennemsnit for perioden 1991-2000. Nedbøren udgør her 895 mm/år (svarende til i alt 38 mia. m³/år). Fordampningen udgør 515 mm/år og der afstrømmer 10 mm/år som overfladisk afstrømning fra bl.a. befæstede arealer mv.

Det vil sige at det samlede input til grundvandet (eller nettonedbøren), som fordeles til både drænvandsafstrømning og til nedsivning fra rodzonen til de øvre grundvandsmagasiner, på landsplan udgør 370 mm/år (svarende til 16 mia. m³/år). Afstrømning fra drænen udgør 170 mm/år. Den samlede overfladenære afstrømning, bestående af både drænvandsafstrømning og overfladisk afstrømning (de 10 mm/år), udgør dermed 180 mm/år.

Grundvandsdannelsen til de øvre magasiner udgør således 200 mm/år, hvoraf en væsentlig del siver videre nedad, og bliver til grundvandsdannelse til de dybere magasiner (i 30-50 m's dybde), i snit 110 mm/år (svarende til i alt ca. 4,7 mia. m³/år). Grundvandsdannelsen til øvre og dybere magasiner bidrager til afstrømning til vandløb med 135 mm/år, grundvandsafstrømning direkte til havet med 10 mm/år fra de øvre magasiner og 35 mm/år fra de dybere magasiner, og vandindvinding med 20 mm/år (i alt ca. 0,9 mia. m³/år).

Der er store regionale forskelle på vandbalancen mellem øst og vest. På Fyn og dele af Sjælland er grundvandsdannelsen til de dybere magasiner kun ca. 15 mm/år (Nordsjælland dog 60 mm/år). For Jylland er dette tal næsten 10 gange større med 145 mm/år.

6.2.2 Processer og definitioner – vandbevægelse over jorden

Nedbør forekommer som regn, sne eller hagl. Når nedbøren falder som sne vil den akkumuleres i et snemagasin, hvorfra den smelter når klimaet betinger det.

Interception er en proces, hvorved nedbøren opfanges, eller interceperes, af vegetationen, hvilket kan resultere i en direkte fordampning af vand, et såkaldt interceptionstab.

Fordampning er den proces hvorved vandets tilstand transformeres fra væske- til dampfase. Fordampning af vand til atmosfæren foregår fra frie vandoverflader, våde overflader samt jord- og planteoverflader.

Fra landområderne fordamper vand hovedsagelig gennem planternes spalteåbninger (*transpiration*) og direkte fra jordoverfladen, planternes overflade osv. (*evaporation*). Transpiration og evaporation, der i reglen ikke kan måles hver for sig, betegnes tilsammen *evapotranspiration* eller i daglig tale fordampning.

Et meget anvendt begreb er *potentiel fordampning*, E_p , som kan defineres som (Jensen og Jensen, 2001): "Potentiel evaporation/evapotranspiration fra en overflade er den maksimale fordampningshastighed, når vandoverfladen er velforsynet med vand". E_p afhænger alene af vejret (klimatiske og mikrometeorologiske faktorer) og af de overfladeegenskaber hos jord og planter, der påvirker energi- og vanddampoverførsel.

Definitionen medfører at E_p er forskellig for overflader med forskellige karakteristika, dvs. den fx varierer fra vegetation til vegetation. For mange praktiske formål er det ønskeligt med et mål for det klimatiske fordampningskrav. Dertil er defineret begrebet *referencefordampning* ET_0 , der er defineret som den potentielle fordampning fra en kortklippet græs, der er velforsynet med vand og med en horisontal udstrækning, der forhindrer advektiv energitransport til målestedet (Jensen og Jensen, 2001)

Den *aktuelle fordampning*, E_a , er summen af evaporation og transpiration fra en bevokset jord ved den givne vandforsyning og klima. E_a vil være mindre end E_p når vandforsyningen er utilstrækkelig.

Infiltration betegner den proces, hvorved vand passerer jordoverfladen under indvirkning af tyngdekraften og kapillære kræfter. Den maksimale hastighed, hvormed jorden kan optage vand betegnes jordens infiltrationskapacitet. Infiltrationskapaciteten afhænger bl.a. af jordbundsforhold og vegetationsdække. Hvis nedbørsintensiteten overskrider infiltrationskapaciteten dannes der vand på jordoverfladen. Afhængig af terrænforhold bliver dette vand enten liggende i overflademagasiner (vandpytter og lignende) indtil det kan infiltrere, eller det strømmer horisontalt som egentlig overfladeafstrømning, hvorfra det enten når et vandløbssystem eller passerer jordoverflader, hvorfra det infiltrerer.

6.2.3 Processer og definitioner – umættet zone

En jord består af en blanding af små og store porer, som kan være enten vand- eller luftfyldte. Den del af jorden, hvor nogle af porene er luftfyldte, betegnes den umættede zone, mens den del, hvor alle porene er vandfyldte betegnes den mættede zone eller grundvandszonen. Det øverste grundvandsspejl er beliggende på grænsen mellem den umættede og den mættede zone. Den øverste del af den umættede zone, hvorfra planterne er i stand til at opsuge vand til transpiration benævnes rodzonen. Infiltrerende vand tilgår jordmagasinet i den umættede zone.

Overfladespænding i jordens porer (kapillærkræfter) bevirker at jorden er i stand til at tilbageholde eller "suge" vand. Kapillærkræfterne virker stærkest på små porer (størst kontaktoverflade mellem vand og jordmateriale per vandvolumen) og mindst på de store porer. Hvis en jord bliver fuldstændig opfugtet som følge af nedbør, er kapillærkræfterne ikke i stand til at tilbageholde vandet i de største porer. Vandet heri vil blive afdrænet på grund af tyngdekraften. Men i porer med diametre mindre end ca. 0,03 mm er kapillærkræfterne i stand til at modvirke tyngden. En jords tilbageholdelsesevne i forhold til tyngdens afdræning betegnes *markkapacitet*. Planter er i stand til at opbygge et sug, så meget af vandet ved markkapacitet trækkes op i planternes rodnet. Den vandmængde der er tilbage, når planterne ikke kan suge mere vand ud, er bundet meget hårdt i jordens allermindste porer. Vandindholdet svarende hertil benævnes for *visnegrænsen*. Vandindholdet mellem markkapacitet og visnegrænsen er den vandmængde der er tilgængelig for planterne til fordampning. Ved højt placerede grundvandsspejl vil kapillærkræfterne kunne trække vand op i rodzonen (*kapillær stigning*) og således øge den vandmængde, der er til rådighed for fordampning.

Planternes rødder kan nå forskellige dybder afhængig dels af jordtype og dels af vegetationsstype. Roddybden vil således være mindre på sandjorde end på lerjorde. *Rodzonekapaciteten* defineres som den maksimale vandmængde, som planterne kan optage fra jordprofilen, før de visner på grund af vandmangel. Rodzonekapaciteten kan bestemmes som differensen mellem vandindholdene ved markkapacitet og visnegrænse inden for den effektive roddybde. Rodzonekapaciteten varierer for landbrugsafgrøder typisk mellem 50 mm og 200 mm, mens den kan være større for skovplanter.

6.2.4 Processer og definitioner – mættet zone

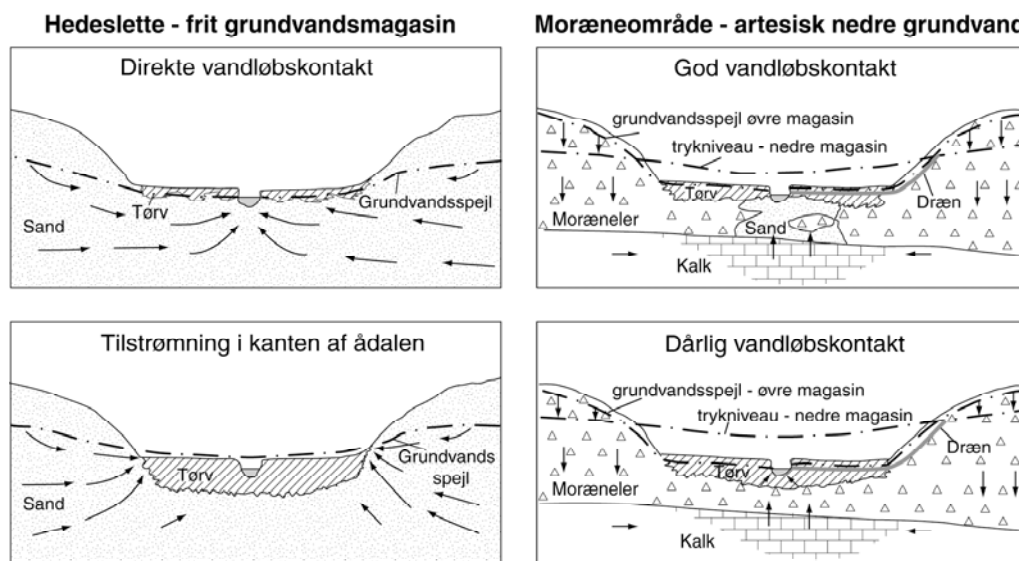
Grundvand er defineret som alle former for vand under jordoverfladen i mættede zoner. Det vil sige, at drænvand er defineret som grundvand. Eftersom vi næsten ikke har egentlig afstrømning på jordoverfladen under danske forhold (de vigtigste undtagelser er visse vådområder og situationer med frossen jord), vil det i praksis sige, at næsten alt det vand der løber i danske vandløb stammer fra grundvandet. Men som illustreret på fig. 6.2 er vandets veje gennem grundvandssystemerne vidt forskellige. Noget vand tager den hurtige vej gennem de øvre grundvandsmagasiner, mens andet tager den længere vej gennem de dybe grundvandsmagasiner.

Det øverste grundvandsmagasin betegnes et *frit magasin*, idet det er kendetegnet ved et frit grundvandsspejl svarende til grundvandets trykniveau. Nedre magasiner vil typisk være afgrænset opadtil af lavpermeable geologiske lag (aquitard), som mange steder består af moræneler. Sådanne magasiner vil typisk have et trykniveau, som er højere end magasinets øvre begrænsning og betegnes derfor for *spændte magasiner*. Såfremt trykniveauet endog er højere end terrænkoten kaldes magasinet for *artesiske*. Ofte benyttes begreberne spændte og artesiske magasiner i flæng, idet de to typer magasiner hydraulisk set opfører sig ens.

De to parametre, der kræves for at kunne beskrive strømningsforholdene i et grundvandssystem er den hydrauliske ledningsevne og magasineringsevnen. Den *hydrauliske ledningsevne*, K (m/s), vil typisk udvise anisotropi, dvs. at ledningsevnen i en retning (fx horisontal, K_h) er større end ledningsevnen i en anden retning (fx vertikal, K_v). Magasineringsevnen udtrykkes for frie magasiner med den *specifikke ydelse*, S_y (m/m), som er et udtryk for den vandmængde, der frigives ved at sænke grundvandsspejlet. For spændte/artesiske magasiner benyttes det *specifikke magasinital*, S (m^{-1}), som er et mål for vandfrigivelsen ved en trykændring som følge af kornskelettets og vandets elasticitet. S er typisk flere størrelsesordner mindre end S_y .

6.2.5 Udveksling mellem grundvand og vandløb

Som nævnt i forrige afsnit bliver langt hovedparten af vandet i de danske vandløb tilført fra grundvandet. De fysiske processer for vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand er også bestemmende for, hvorledes grundvandsinvinger påvirker vandføringen i vandløbene, dvs. på hvilke strækninger vandløbspåvirkningen sker og hvorledes den er fordelt hen over året. Samspelet mellem grundvand og overfladevand er specielt vigtigt i de ånære områder. Den fysiske vigtigste parameter til beskrivelse af vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb er den hydrauliske ledningsevne samt tykkelsen af det sediment, som udgør vandløbets bund. På fig. 6.3 er vist fire forskellige geologiske typesituationer, som vil resultere i væsentlig forskellige hydrauliske ledningsevner og vandløbspåvirkninger.



Figur 6.3 Eksempler på typesituationer med forskellige strømningsveje i ånære områder. Til venstre en hedeslette med frit grundvandsspejl og henholdsvis direkte kontakt med vandløbet og tilstrømning primært i kanten af ådalen. Til højre et leret morænelandskab med frit øvre og artesisk nedre grundvandsmagasiner og henholdsvis god og dårlig vandløbskontakt.

6.2.6 Vandbalanceligningen

Vandbalancen i et opland kan udtrykkes ved vandbalanceligningen:

$$N = E_a + Q_o + Q_u + P + \Delta S$$

hvor

N = nedbør

E_a = aktuel fordampning

Q_o = den afstrømning, der kan måles i vandløbene

Q_u = underjordisk afstrømning, dvs den mængde der direkte via grundvandet løber til et

naboopland eller til havet
P = oppumpning til vandindvinding
 ΔS = magasinændring, som ofte kan sættes lig nul, hvis balancen beregnes for en periode på flere år

Vandindvindingen, P, forudsættes i vandbalanceligningen eksporteret og anvendt uden for det pågældende opland. Såfremt den oppumpede vandindvinding anvendes inden for oplandet, eksempelvis til vanding eller til vandforsyning, hvorfra spildevandet udledes til vandløb, skal der tilføjes ekstra led til ligningen.

Selv om vandbalanceligningen i princippet er meget simpel, er en korrekt opgørelse af de enkelte størrelser i praksis behæftet med betydelig usikkerhed. Det skyldes dels, at der er store usikkerheder på målinger af nedbør og fordampning og dels, at disse målinger oftest er punktmålinger, som efterfølgende skal opskales til oplandsskala.

6.2.7 Tidligere opgørelser af vandbalancen

De første videnskabelige undersøgelser af vandbalanceforhold i Danmark blev gennemført for 150 år siden af Danmarks første hydrolog, Ludvig August Colding, i forbindelse med vurderinger af mulighederne for grundvandsindvinding til København (Colding, 1872). Samme Colding lavede de første danske fordampningsmålinger i Peblingesøen i årene 1849-59 som led i et studie af vandbalance og grundvandsdannelsesforhold.

Den første samlede undersøgelse af vandbalanceforhold i Danmark med inddragelse af flere forskellige institutioner blev foretaget af Vandbalanceudvalget (1952). Udvalgets opgave var at "undersøge ligevægtstilstanden mellem nedbøren på den ene side og nedsivning, afstrømning, fordampning og transpiration på den anden og overveje, hvad der muligt kunne gøres for at opnå en hensigtsmæssig fordeling af nedbøren på de 4 sidstnævnte størrelser". På udvalgets indledende møde i 1939 blev der bl.a. fremsat følgende opfattelser af problemerne:

- En repræsentant for Akademirådet (ATV) nævnte at "den vandmængde, der var til rådighed for vandforsyningen, i de senere år havde været aftagende. Man havde tidligere regnet med at 1/3 af regnvandet sivede ned og dannede grundvand, men i de senere år havde det vist sig, at man kun kunne regne med 1/5 á 1/6. Det var nærliggende at tænke sig, at dræningen havde bidraget til denne udvikling".
- En repræsentant fra Landbohøjskolen mente "at der kunne være grund til at forvente at fordoblingen af landbrugets høstudbytte i de sidste 30 år havde krævet et forøget vandbehov på ca. 200 mm årligt".

Disse opfattelser, som i henhold til vores nuværende viden er temmelig forkerte, illustrerer den daværende usikkerhed om de hydrologiske forhold og størrelsesordner. Vandbalanceudvalget gjorde i øvrigt gode fremskridt og kunne efter mere end 10 års arbejde bl.a. konkludere ud fra en analyse af data for nedbør, afstrømning, oppumpning og grundvandspejlinger, at grundvandsdannelsen i Lejre og Hove-Nybølle områderne var af størrelsesorden 100 mm/år henholdsvis 140 mm/år. Disse tal svarer ganske godt til vores opfattelse i dag.

Forureningsrådet nedsatte i 1970 en arbejdsgruppe, som bl.a. fik til opgave at foretage en kortlægning af Danmarks vandressourcer. I gruppens rapport (Forureningsrådet, 1971) er der lavet en opgørelse på amtsbasis (amter før kommunereformen i 1972) for de forskellige elementer i vandbalancen. Her blev oppumpningen, P , og den underjordiske afstrømning, Q_u , anset for at være neglige og den aktuelle fordampning, E_a , blev skønnet som differensen mellem den målte nedbør og den målte afstrømning.

Forureningsrådets publikation er klassikeren i anvendelse af vandbalancemetoden for hele Danmark. Her blev der benyttet ukorrigerede nedbørsværdier. Siden da er Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) blevet opmærksom på, at den nedbør, der måles i DMI's stationsnet undervurderer nedbøren ved jordoverfladen. DMI anbefalede derfor i 1979, at den målte nedbør korrigeres med faktorer, som i årsgennemsnit på landsplan øgede nedbøren med ca. 16% (Madsen and Allerup, 1979).

Efter introduktion af nedbørskorrekturen i 1979 er der flere gange blevet gennemført studier af vandbalance i større oplande. Det er dels sket i en række forskningsprojekter og dels i en række rådgivningsopgaver, hvor hydrologiske modeller benyttes til at beregne aktuel fordampning. I flere af forskningsprojekterne for bl.a. Suså og Stevns (Refsgaard, 1981; Aslyng og Hansen, 1982), Karup (Aslyng og Hansen, 1982; Miljøstyrelsen, 1983; Storm et al., 1990) og Langvad (Storm et al., 1983) er det blevet dokumenteret, at vandbalancen stemte på grundlag af den bedst mulige viden på daværende tidspunkt om nedbør- og fordampningstal. En oversigt over vandbalancerne og de tilhørende forudsætninger ved disse oplandsstudier, som blev gennemført i perioden 1977-90, kan findes i Refsgaard (2002).

I begyndelsen af 1990'erne anbefalede Dansk JordbrugsForskning, at den hidtidig anvendte formel til bestemmelse af referencefordampningen, Makkink's formel (Aslyng og Hansen, 1982), blev erstattet af en modificeret udgave af Penman's formel (Mikkelsen og Olesen (1991)). Makkink's formel er baseret på data for globalstråling og temperatur, mens Penman's formel yderligere benytter vindhastighed og luftfugtighed. Senere undersøgelser (Detlefsen og Plauborg, 2001) har dog vist at Penman værdierne underestimerer referencefordampningen på mange stationer på grund af ikke repræsentative data for vindhastighed og især luftfugtighed. Underestimeringen er på 50 - 100 mm/år. I 1998 udsendte DMI nye standardværdier af nedbørskorrekturen (Allerup et al., 1998). De nye korrektionsfaktorer resulterer i nedbørsestimater som på årsbasis ca. 5% større end de gamle værdier, jf. afsnit 6.3.

Referencefordampningen baseret på den modificerede Penman og de nye 1998 tal for nedbørskorrektion var grundlaget for DMI's klimagrid og NOVA. Med introduktionen af de lavere tal for referencefordampning og de højere standardværdier for nedbørskorrektion, blev der konstateret alvorlige problemer med at få vandbalancen til at stemme (Ovesen et al., 2000; Refsgaard et al., 2001; Plauborg et al., 2002). Det var grunden til fællesnotatet fra DJF/GEUS/DMU/DMI (Plauborg et al., 2002), hvor det blev konkluderet, at der ikke er konsistens mellem måletal og teorier for nedbør, fordampning og vandløbsafstrømning, når det opgøres på oplandsbasis, og at fejlen på opgørelsen af vandbalancen resulterer i et "overskud" af størrelsesorden 100 mm/år. Notatet fremkom med anbefalinger for, hvorledes vi kan lave den bedst mulige opgørelse af vandbalancen på det nuværende vidensgrundlag

og anbefalede endvidere, at der snarest muligt bør etableres et forbedret vidensgrundlag via et tværgående forskningsprogram med deltagelse af de relevante forskningsinstitutioner og universiteter.

6.2.8 Usikkerheder på de enkelte komponenter i vandbalancen

Usikkerhedsintervallet på opgørelse af vandbalancen på oplandsbasis blev i Plauborg et al. (2002) vurderet til [50; 150 mm/år]. Selv med de justeringer, der blev anbefalet i samme notat, vil der være en betydelig usikkerhed [-50; + 50 mm/år] på opgørelsen af vandbalancen. De væsentligste usikkerhedskilder på de enkelte komponenter er følgende:

Nedbør.

De nye korrektionsværdier for nedbør er resultatet af et omfattende, og på mange områder banebrydende, arbejde. Ikke desto mindre må brug af de nye korrektionsværdier i vandbalancestudier anses som værende behæftet med en vis usikkerhed, idet de endnu er så nye, at de ikke har været testet i vandbalancestudier, eller valideret mod et større uafhængigt dansk punktdatasæt. Det gælder især for korrektion af snenedbør, som slår kraftigt igennem på korrektionsværdierne for vintermånederne.

Selvom punktværdierne, med de ovennævnte forbehold over for korrektionsværdierne, må anses for at være nøjagtige, er der en ikke ubetydelig usikkerhed knyttet til arealværdierne. Tidligere forskningsresultater (Allerup et al., 1982) viser således, at usikkerheden på arealnedbøren i Susåens opland, angivet som relativ middelfejl (= standardafvigelse divideret med forventet middelværdi), er 60%, 10% og 6% for henholdsvis daglig, månedlig og årlig nedbør.

Fordampning:

De hyppigst anvendte metoder for beregning af aktuel fordampning ud fra referencefordampning har haft som forudsætning, at referencefordampningen har været et mål for den maksimale fordampning. Det resulterer i en underestimering af den aktuelle fordampning, idet de fleste landoverflader (afgrøder) i perioder kan have en fordampning som er 10-20% højere end referencefordampningen. Det er der forsøgt taget højde for i anbefalingerne i Plauborg et al. (2002) med angivelse af overfladekoefficienter, som varierer med afgrøde og med årstiden. Vidensgrundlaget med hensyn til hvordan forskellige afgrøder fordamper er dog stadig mangelfuld, hvorfor der er en betydelig usikkerhed knyttet til estimeringen af disse koefficienter.

Fordampningen for visse overfladetyper er dårligt undersøgt. Det gælder specielt fordampning fra skove og vådområder.

Der sker løbende ændringer i landbrugsafgrøderne og en effektivisering af produktionsformerne. Høstudbyttet fra landbrugsafgrøder er således øget med ca. 30% i foderenheder pr. hektar. Hvorledes det eventuelt påvirker fordampningen fra landbrugsafgrøderne er ikke grundigt belyst.

Afstrømning:

Usikkerheden på afstrømningsdataene vurderes at være væsentlig lavere end usikkerhederne på nedbør og fordampning. Usikkerheden (relativ middelfejl) på den målte afstrømning for vandføringsstationer ved mellemstore og store oplande vurderes typisk at ligge på 5-10% for daglige værdier, dog med mulighed for større fejl i ekstreme hændelser. Usikkerheden på årsmiddelværdier er vurderet at være på op til 5%.

Opskalering fra punkt- til gridværdier:

I forhold til tidligere vandbalancestudier repræsenterer anvendelse af gridværdier i stedet for punktværdier et paradigmeskift, som måske kan have konsekvenser for den videre anvendelse af nedbørsdata. Eksempelvis vil griddata indeholde en udjævning af input, fx en systematisk tendens til flere dage med nedbør, idet der vil være nedbør i et grid såfremt blot en af de indgående stationer rapporterer nedbør. Dette vil påvirke fordampningsberegningerne, idet den samme nedbør fordelt på flere nedbørsdage alt andet lige vil resultere i en større beregnet fordampning på grund af større interceptionstab.

Tidsmidlede data:

Ligesom opskalering i stedet (jf. ovenfor) kan påvirke vandbalanceopgørelserne gælder det samme forhold i høj grad ved opskalering i tid. Hvis der eksempelvis benyttes timeværdier for nedbør i en beregningsmodel med et beregningstidsskridt på en time vil det resultere i en mindre beregnet aktuel fordampning end ved anvendelse af døgnværdier, fordi den samme nedbør vil blive fordelt på kortere tidsperioder og derfor, alt andet lige, resultere i et større beregnet interceptionstab. For at kompensere for denne skalafejl, anvender mange modeller interceptionsmagasiner, som er afhængige af tidsopløsningen af nedbørsdata, dvs. et større (og fysisk mere realistisk) magasin ved små tidsskridt og et mindre magasin ved store tidsskridt. Et andet eksempel er at beregningen af referencefordampningen ved hjælp af de formler der er angivet i afsnit 6.4 giver forskellige resultater med forskellige længder af beregningsskridt. Derfor beregnes referencefordampningen i dag som standard ved hjælp af beregningstidsskridt på 1 time eller mindre.

6.3 Nedbør

Systematisk indsamling af klimadata fra flere lokaliteter rundt om i Danmark blev påbegyndt omkring 1860 med oprettelsen af en meteorologisk komité under Det kgl. Danske Landhusholdningsselskab. Aktiviteterne blev videreført af Meteorologisk Institut ved dets oprettelse i 1872, og siden har der med vekslende metoder, stationstæthed og formål været foretaget landsdækkende måling af klimadata med relevans for vandbalancestudier i Danmark.

De to hovedaktører på feltet er i dag Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og Danmarks Jordbrugsforskning (DJF), der i høj udstrækning samarbejder og koordinerer aktiviteterne med hensyn til såvel lokalisering af målestationer, som valg af måletekniske løsninger.

6.3.1 Metoder til måling af nedbør

I Danmark er der – med henblik på beskrivelse af nedbørens mængde og udbredelse – flere metoder tilgængelige. Måling af nedbørmængde (og varighed/intensitet) i *et punkt* ("nedbørmåling"); estimering af udbredelse ud fra *vejrradar* målinger, samt *stedlig interpolation*/beregning af mængde i et regulært grid (f.eks. $10 \times 10 \text{ km}^2$ eller $40 \times 40 \text{ km}^2$) typisk ud fra punktnedbørmålinger.

Af disse er det – med henblik på vandbalanceopgørelser indenfor de seneste 40 år – den første og den sidste der har praktisk relevans. Metoder til brug af vejrradar til rutinemæssig opgørelse på landsplan er endnu ikke operationelle (Steffensen et al., 2001), og vil i sigens natur heller ikke kunne bruges bagud i tid/på historiske data.

Mht. punktnedbørmåling, dvs. måling af mængde (og evt. tid/varighed/intensitet) i et punkt, har der indenfor de seneste 40 år været flere landsdækkende metoder/målenet i anvendelse. Nedbør måles i Danmark af DMI i både et manuelt og flere automatiske målestationsnet. Nedbørmåleren i det manuelle net er Hellman måleren, som er placeret i 1,5 m højde på godt 500 lokaliteter i Danmark. Målerne i de automatiske net er pt. af typerne Geonor og Rimco. I førstnævnte registreres nedbøren som vægtændringer i målerens opsamlingsenhed, mens sidstnævnte er en vippekarmåler. Geonor målingen foretages bl.a. i samarbejde med DJF og foregår p.t. ved ca. 12 stationer i Danmark. Geonor nettet er under udbygning og indeholdt i DMI og DJFs arbejde med renovering af nettet af automatiske klimastationer, der – når arbejdet afsluttes i 2005 – vil omfatte et landsdækkende net på 20-30 målere (af typen Geonor, eller af en evt. afløser "Pluvio").

Rimcomålingerne foretages i "Spildevandskomitéens Regnmålersystem" (Nielsen, 2001) som omfatter omkring 70 målere. Målerne ejes som udgangspunkt af de enkelte brugere, og nettet er irregulært fordelt over landet idet målerne typisk står ved renseanlæg mv. Nettet er påbegyndt med de første målere i slutningen af 1970'erne/begyndelsen af 1980'erne og derefter udbygget i takt med brugerbehov. Rimconettet's formål (og styrke) er ikke mindst måling af nedbørintensitet i forbindelse med flydende nedbør ("regn") til teknisk

brug, typisk ved dimensioneringsopgaver indenfor teknisk hygiejne. Nettet er således ikke bestykket/designet (hverken instrumentelt eller mht. geografisk fordeling) til landsdækkende vandbalancestudier, men kan anvendes hertil som supplerende data.

Nettet af automatiske nedbørmålere på klimastationer (typen Geonor og evt. afløseren Pluvio) er under opbygning (de første målere blev sat i drift i forbindelse med de såkaldte "automatiske klimastationer" i slutningen af 1980'erne). Der har imidlertid været en række instrumentelle overvejelser (for alle brugere af Geonor målere), der gør at en alternativ måler, Pluvio, er under overvejelse med hensyn til fremtidens målnet. Geonor nettet er således vurderet at være i orden til *mængdemålinger* (og således egnet til vandbalancestudier på tidsskala f.eks. time, døgn og grovere opløsning). Nettet er imidlertid først blevet rimelig landsdækkende indenfor de seneste 10 år, og brug af Geonormålinger er således ikke det primære valg mht. nedbørdata for længere serier.

Tilbage er det manuelle nedbørmålnet, der gennem de seneste 40 år har haft mellem 300 og 650 nedbørstationer fordelt jævnt over hele landet. Nettet er rygraden i dansk nedbørmåling, og pt. også det datagrundlag som den tredje metode – den nuværende standard for *stedlig interpolation* i form af DMI's "Klimagrid Danmark" (Scharling 1999a, 1999b, 2000) er baseret på.

Nedbør målt med Hellman måleren anses for at være af høj kvalitet, men er, som de fleste andre konventionelle nedbørmålinger/målere, behæftet med en række systematiske fejl hvoraf den største hidrører fra vindens påvirkning af nedbørpartiklerne; den såkaldte vind-effekt (Robinson and Rodda, 1969; Allerup og Madsen, 1979; Vejen et al., 1998) bl.a. fordi målingen af praktiske hensyn ikke foretages i jordniveau men i 1,5 meters højde.

I forbindelse med omtalen af nedbørkorrektion, er det vigtigt at påpege, at kun målinger fra det manuelle net af Hellmann målere diskuteres her, og at en generel anvendelse af korrektion af målinger med Geonor og Rimco målere i vandbalancesammenhæng ikke er undersøgt/dokumenteret og derfor bør afvente en evt. særskilt redegørelse.

6.3.2 Nedbørkorrektion (læforhold, wetting, flydende/fast nedbør mv.)

Nedbør målt med Hellman måleren anses for at være af høj kvalitet, men bør (bl.a. fordi målingen er foretaget i 1,5 meters højde) korrigeres til jordoverfladen for at kunne indgå i vandbalanceberegninger. Denne korrektion er ikke triviell og afhænger af flere forhold, bl.a. læforhold, nedbørtype, temperatur, vindhastighed og nedbørintensitet.

Siden starten af 1980'erne har det været almen praksis i vandbalanceopgørelser i Danmark at korrigere den manuelle målte nedbør for aerodynamiske fejl og wettingtab efter en tabel med standardværdier publiceret af Allerup og Madsen (1979) (Tabel 6.1).

Tabel 6.1 Standardværdier (%) for nedbørkorrektion 1931-60 (Allerup og Madsen, 1979)

Lækategori	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Året
Beskyttet (A)	18	19	20	14	12	11	9	9	10	10	12	15	12
Moderat (B)	21	22	22	18	15	14	12	11	13	14	16	19	16
Frit eksponeret (C)	29	31	31	22	18	17	14	13	16	18	20	25	20

Tabellen er udarbejdet på baggrund af beregninger med en empirisk korrektionsmodel gældende for flydende nedbør ved vindhastigheder op til 15 m/s og nedbørintensiteter op til 15 mm/time. Korrektionsmodellen er udviklet af forfatterne på baggrund af 659 målinger af vind- og nedbørforhold fra tre stationer (Karup, Skrydstrup og Værløse) i årene 1971-75. Standardværdierne er derefter beregnet med udgangspunkt i klimadata målt over en 17 års periode (1959-75) på to lokaliteter i Danmark (Stevns og Karup), og antaget gældende for normalperioden 1931-60. I mangel af en egentlig korrektionsmodel for fast nedbør, blev standardværdier for fast nedbør estimeret ud fra tilgængelig litteratur. Standardværdierne publiceret i 1979 (Tabel 6.1) har siden været brugt og alment accepteret i vandbalancestudier i Danmark (Plauborg et al., 2002).

Som led i et nordisk forskningsprojekt om nedbørkorrektion af fast nedbør, har DMI siden kunne udvide korrektionsmodellen med en empirisk delmodel for fast nedbør (Vejen et al., 1998, 1999, 2000, 2001). Denne delmodel er udviklet på baggrund af internationalt initierede og anerkendte feltmålinger foretaget på et forsøgsfelt i Finland (WMO, 1998) over en periode på 6 vintre (1987-1993). Datamaterialet omfattede 325 datasæt med nedbør i fast form, og den empiriske model har et gyldighedsområde for vindhastigheder på mellem 0 og 7 m/s, og for temperaturforhold mellem + 1°C og - 12°C.

De to nævnte empiriske modeller er siden (Vejen et al., 1998, 1999, 2000, 2001) kombineret i en samlet korrektionsmodel for fast, flydende og mixed nedbør, der er nedbørforskerens bedste bud på en korrektionsmodel til brug på danske forhold. I forlængelse af forskningsprojektet er denne model anvendt til beregning af nedbørkorrektionen på døgnværdier fra 212 nedbørstationer i 8 år (1989-1997) (Vejen et al., 1999). Som input til beregning af korrektionsfaktorerne er anvendt klimadata fra 12 basis klimastationer, der er placeret centralt i hver sin region/landsdel. Det bemærkes, at året 1989 er valgt som start år, idet det er det første år fra hvilket der foreligger systematiske målinger af de nødvendige klimadata til at foretage beregningerne for hele landet.

De omfattende beregninger og resultater er aggregeret og publiceret i bl.a. en tabel med standardværdier for nedbørkorrektion 1961-90 (Allerup et al., 1998), Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Standardværdier for nedbørkorrektion 1961-90 (Allerup et al., 1998)

Lækategori	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Året
Beskyttet (A)	29	30	26	19	11	9	8	8	9	10	17	26	16
Moderat (B)	41	42	35	24	13	11	10	10	11	14	23	37	21
Frit eksponeret (C)	53	53	45	29	16	13	12	12	13	17	29	48	27

Som det fremgår af tabellerne 6.1 og 6.2 er den væsentligste forskel mellem de to sæt standardværdier de højere standardværdier for vintermånederne i Tabel 6.2.

Endelig er resultaterne af forskningsprojektet omkring udledning af en model for nedbørkorrektion anvendt til at beregne månedlige korrektionsfaktorer for de nævnte 12 regioner/basisstationer i årene 1989-2000 (Vejen et al., 2000, 2001) og 2001 (Vejen, 2002). Disse benævnes populært for "dynamiske" idet de i modsætning til standardværdierne i Tabel 6.2, ikke blot antages at afspejle årstidsvariationen, men også regionale og tidlige forskelle over den nævnte 12 års periode. Arbejdet har været omfattende og er på visse områder banebrydende, hvilket til gengæld også betyder, at der ikke foreligger erfaringer (og således sammenligningsgrundlag) fra andre lande mht. beregningsresultater som de nævnte.

Mht. hvilket sæt nedbørkorrektionsfaktorer man kan anbefale benyttet i vandbalancestudier, har udgangspunktet indenfor de seneste par år været at pege på muligheden for brug af de seneste forskningsresultater. Det skal i denne sammenhæng pointeres at såvel de "reviderede standardværdier" (Tabel 6.2) som de "dynamiske" korrektionsfaktorer er nedbørforskernes bedste bud på landsdækkende værdier, baseret på eksisterende studier og beregningsmodeller udviklet for enkeltstående punkter. Det er væsentligt at holde sig for øje, at der i forbindelse med nedbørforskningen ikke er indgået studier af andre led i vandbalancen. Der har således hidtil ikke været nogle erfaringer med brug af korrektionerne i vandbalanceberegninger på oplandsskala.

I forbindelse med udarbejdelse af Plauborg et al., (2002) er der beregnet nedbørsmængder for hele landet for perioden 1990-2000 med bl.a. korrektionerne "Standard korrektioner 1961-90" og "Dynamiske korrektioner" (Scharling og Kern-Hansen, 2002). Beregningerne viser at der i gennemsnit for hele perioden kun er en forskel på 5 mm/år, men at der samtidig er regionale forskelle. For de enkelte år i perioden er forskellen mellem de to metoder større, idet det som forventet for år, hvor der stort set ikke har sneet, ses at den "dynamisk" korrigerede nedbør er mindre end nedbør korrigeret med standardværdier, og omvendt i år hvor det har sneet mere. Selvom de "dynamiske korrektioner" umiddelbart (intuitivt såvel som teoretisk) synes at være de mest oplagte at anvende, har foreløbige beregninger vist, at der kan fremkomme u hensigtsmæssige gradienter lokalt og imellem de 12 regioner/basisstationer. Dette indikerer, at det i visse tilfælde kan være problematisk uden videre at overføre korrektioner beregnet for den enkelte referencestation til resten af regionen.

Det er på den baggrund, at det er anbefalet, at der til generelle beregninger (over længere tid/gennemsnitsbetragtninger) og over større områder (f.eks. større oplande eller landet som helhed) anvendes de aggregerede gennemsnitsværdier i form af standardværdier (Tabel 6.2), indtil der i anden sammenhæng er gennemført mere detaljerede studier og beregninger, der måtte pege på andre konklusioner.

Afslutningsvis skal det nævnes, at emnet nedbørkorrektion (og den kun delvist operationaliserede viden) til tider kan forvirre og endog medføre en engageret debat blandt fagfolk i Danmark. Ikke mindst kan det opfattes frustrerende, at man nu har målt, vejat og skrevet om nedbørkorrektion i over 20 år, og når man så har brug for det i praksis – så er der "kun" standardværdier at holde sig til. Forklaringen på at man er nået langt – men ikke længere – ligger primært i, at emnet er uhyre vanskeligt at få styr på/kvantificeret. De studier der fore

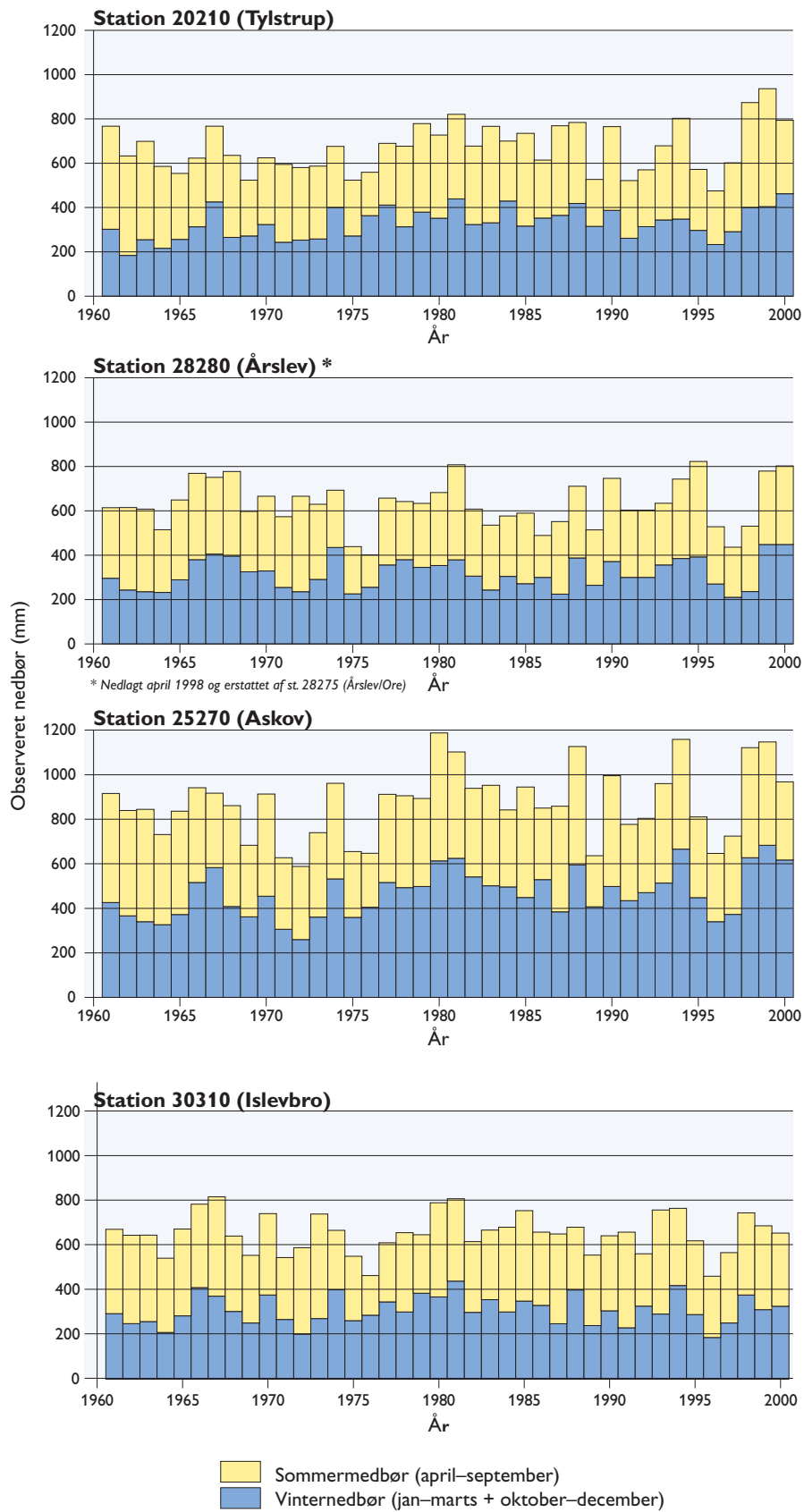
ligger er empiriske og baserer sig på målinger af meteorologiske forhold (herunder ekstremer) der skal forekomme i praksis, før de kan indgå i beregningsgrundlaget.

De forsøg vi har set i Danmark de senere år i form af "dynamisk" korrektion er nyheder i international sammenhæng. En rundspørge blandt europæiske meteorologiske institutter (Kern-Hansen, 2002) viser at ud af 18 lande er der ingen andre end Danmark, der har forsøgt at operationalisere/beregne "dynamisk korrektion" for det landsdækkende net af manuelle nedbørmålere, samt at der kun er fire lande (Danmark inklusiv) der har forsøgt at beregne standard korrektionsfaktorer. De øvrige meteorologiske institutter har ikke emnet på dagsordenen, enten fordi det ikke er efterspurgt, eller fordi det (typisk) anses for umuligt at beregne udfra det eksisterende datagrundlag i de enkelte lande.

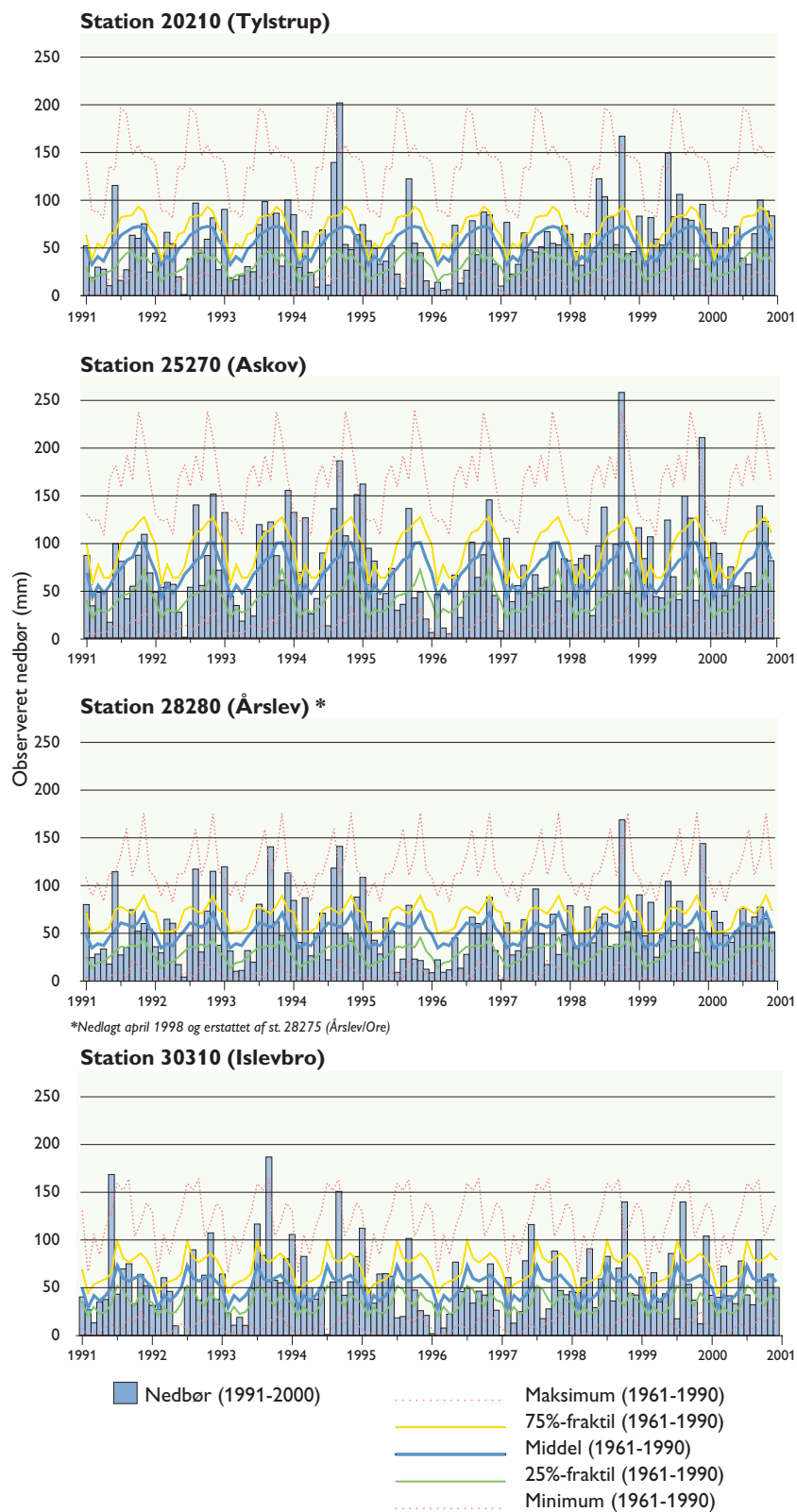
6.3.3 Tidslig variation i nedbør 1991-2000 / 1961-1990

Den tidslige variation i nedbøren i perioden 1991-2000 sammenlignet med standard normalperioden 1961-1990 er illustreret på Figs. 6.4 og 6.5 for fire lokaliteter: Tylstrup, Askov, Årslev og Islevbro. Sammenlignet med normalperioden 1961-1990 indeholder 1991-2000 såvel meget våde år som meget tørre år. 1995 og 1999 har således for henholdsvis Årslev og Tylstrup den højst målte nedbør i 40-års perioden, mens 1994 har den 2. største henholdsvis 5. største nedbør over 40-års perioden for Askov og Islevbro. Tilsvarende er 1996 det år i 40-års perioden med lavest registreret nedbør for Tylstrup og Islevbro, mens den for Årslev og Askov er henholdsvis den 2. og 3. laveste nedbør i hele perioden. Gennemsnitsnedbøren for de tre stationer Tylstrup, Årslev og Askov for 1991-2000 ligger mellem 3% og 6% over gennemsnitstallene for normalperioden 1961-1990, mens det ligger 1½% under for Islevbro.

Af Fig. 6.5 fremgår det at de lave nedbørstal for 1996 forekommer i de første 4 måneder og ovenikøbet er en fortsættelse af lav nedbør i de sidste tre måneder af 1995. Hele vinterhalvåret 1995/96 var således usædvanligt tørt, hvilket resulterede i en exceptionel lav grundvandsdannelse. Tilsvarende ses den ekstra høje nedbør i 1994 primært at forekomme i vinter- og efterårsmånederne, hvorfor den må forventes at slå kraftigt igennem på grundvandsdannelsen.



Figur 6.4 Årlig målt nedbør (uden korrektion) for stationerne Tylstrup, Årslev, Askov og Islevbro 1961-2000. Kilder: Frich et al. (1997) og DMI's klimadatabase. Figurer fra DMI.



Figur 6.5 Månedlig målt nedbør (uden korrektion) for stationerne Tylstrup, Årslev, Askov og Islevbro 1991-2000 sammenholdt med statistiske værdier for perioden 1961-1990. Kilder: Frich et al. (1997) og DMI's klimadatabase. Figurer fra DMI.

6.3.4 Usikkerhed på nedbør

Punktmålinger - Korrektionsfaktoren.

I forbindelse med de systematiske tiltag mht. beregning af månedsvise nedbørkorrektion i Danmark, er der gennemført en række usikkerhedsvurderinger og –beregninger, vedrørende usikkerheden på nedbørkorrektionen, der jo er en korrektion af de erkendte systematiske fejlkilder i forbindelse med målingen. Et mål for usikkerheden på døgnbasis er sammensat af flere væsentlige bidrag, herunder:

- Usikkerheden på selve korrektionsmodellen
- Usikkerheden som følge af ekstrapolation af korrektionsfaktoren fra et punkt til et areal
- Usikkerheden på beregning af de kontrollerende meteorologiske variable.

En redegørelse af hver af disse er gengivet i bl.a. (Vejen, 2002), der konkluderede, at usikkerhed på månedskorrektionsfaktorer varierer mellem 11% og 2% afhængig af hvor mange nedbørdage der har været i måneden. For en "standard" måned med i snit 15 nedbørdøgn ligger den gennemsnitlige usikkerhed på korrektionsfaktoren på ca. 3%.

Punktmålinger – dynamiske korrektionsfaktorer

De anbefalede standardværdierne for nedbørskorrektion (Tabel 6.2) indeholder store korrektioner for snedebør i vintermåneder. Det kan dog for individuelle måneder, som snemæssigt afviger fra et middelår, resultere i betydelige fejlskøn for nedbørens størrelse.

Stedlig interpolation - Gridningen

I de tilfælde hvor man som mål for nedbøren anvender stedligt interpolerede værdier (in casu f.eks. DMI's Klimagrid Danmark) er det endvidere relevant at overveje usikkerheden på den rumlige interpolation/gridningen.

Man har stadig til gode at supplere dokumentationen bag Klimagrid Danmark med relevante statistiske usikkerhedsberegninger. Intuitivt tegner der sig dog det billede at nedbørinterpolationen i Klimagrid Danmark, alt andet lige må forventes at have en meget begrænset usikkerhed i sig selv, idet der i gennemsnit (og tillige i praksis i langt de fleste tilfælde) er mindst en direkte måling pr. gridcelle.

Tidligere forskningsresultater antyder dog at usikkerheden på bestemmelse af arealnedbør kan være betydelig, afhængig af metodevalg. Således viser Allerup et al. (1982), at usikkerheden på arealnedbøren i Susåens opland, beregnet efter TTSI metoden for 1½ års data fra 9 nedbørmålere i oplandet, er 60%, 10% og 6% for henholdsvis daglig, månedlig og årlig nedbør.

Korrektion for andre typer nedbørmålere

De anbefalede nedbørskorrektioner gælder kun for målinger fra det manuelle net af Hellmann målere. Der eksisterer således ikke datagrundlag til at anbefale, hvorledes data fra fx Geonor og Rimco målere bør korrigeres.

6.4 Fordampning

6.4.1 Måling af fordampning

Egentlige lange tidsserier med målinger af aktuel fordampning E_a fra en given overflade eksisterer ikke, hverken under danske eller udenlandske forhold. Derimod har flere institutioner, først og fremmest Den Kgl. Veterinær og Landbohøjskole (KVL) og Danmarks JordbrugsForskning (DJF), gennemført målinger gennem mange år af potentiel fordampning E_p fra en fri vandoverflade i vækstperioden april til november. For at muliggøre en operationel og praktisk anvendelse af denne fordampning er den efterfølgende blevet korrigeret til referencefordampningen ET_0 , f.eks. under anvendelse af månedlige korrektionskonstanter. ET_0 udtrykker som tidligere nævnt den potentielle fordampning fra en kortklippet græsoverflade, der er velforsynet med vand. I en periode på ca. 30 år (1960-90) er ugentlige målinger af netop referencefordampningen gennemført i et landsdækkende net bestående af op til ca. 60 fordampningsmålere af typen HL315. En nærmere beskrivelse af denne måler er givet af f.eks. Aslyng (1976). Det landsdækkende net blev nedlagt i 1991. Nedlæggelsen var begrundet i en analyse af Mikkelsen og Olesen (1991) der fandt, at kvaliteten på nogle af stationerne ikke var tilstrækkelig god og metoden generelt ikke var tidssvarende. Derimod anviste forfatterne flere operationelle beregningsmetoder, hvorved der kunne opnås data på døgnbasis og ligeledes data af en betydelig forbedret kvalitet.

6.4.2 Måling af klimaparametre til beregning af reference fordampning efter Penman

Måling af de klimaparametre, der indgår i beregninger af reference fordampning efter Penmans formel (i forskellige afskygninger) samt mindre data krævende formler, omfatter måling af vindhastighed, relativ fugtighed, temperatur og stråling.

Der findes ikke lange måleserier for disse klimavariabler i Danmark. De længste tidsserier af klimavariabler i Danmark stammer dels fra DMI's manuelle klimastationer, hvor der tre gange om dagen blev observeret vindhastighed, relativ fugtighed og temperatur samt fra et antal DMI stationer til registrering af antal solskinstimer. På baggrund af disse data er det muligt at lave grove skøn for de ønskede klimavariabler.

Den længste tidsserie af målinger af disse klimavariabler stammer fra KVL (Institut for Jordbrugsvidenskab, Laboratoriet for Agrohydrologi og Bioklimatologi) som på sin Klima- og Vandbalancestation i Tåstrup har gennemført målinger siden 1955 (Jensen, 1966).

En landsdækkende direkte måling af disse klimavariabler startede først i 1989 på et net af såkaldte "automatiske klimastationer" (i DMI og DJF regi). Dette net har omfattet i størrelsesordenen 20 - 35 stationer gennem de seneste 10-15 år. Som årene er gået (og automatisering af de øvrige standard meteorologiske stationer ("Synop stationer")) har holdt sit

indtog i Danmark), er der sket en gradvis sammensmeltning af nettene af automatiske klimastationer og andre meteorologiske stationer.

Der har samtidig været mindre fokus på kalibrering og kontrol af de enkelte sensorer (sammenlignet med stationsnettets første driftsår), hvilket har betydet at der i de senere år har kunnet konstateres problemer med bl.a. måling af relativ fugtighed (Detlefsen og Plauborg, 2001). Nye typer af sensorer, dataloggere og en fælles renoverings og standardiseringsplan (DMI og DJF imellem) er dog medvirkende til at vi i Danmark er på vej mod et nyt, top moderne landsdækkende net af ens vejr/klimastationer der forventes færdig etableret i 2005. Indtil da må datagrundlaget til landsdækkende beregning af reference fordampning i sagens natur komme fra de målestationer der findes, enten som punkt observationer, eller som landsdækkende gridværdier (beregnet i f.eks. DMI's Klimagrid Danmark).

6.4.3 Bestemmelse af referencefordampning (ET_0) og afgrødekoefficienter

Den klassiske ligning til til beregning af potentiel fordampning fra kortklippet græs - referencfordampningen ET_0 – er udledt af Penmann (1948, 1956)

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p f(u_2)(e_s - e_a)}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (6.1)$$

hvor R_n er nettostrålingen over en kortklippet græsoverflade, G er jordvarmefluxen, Δ hældningen på kurven for mættet damptryk, λ er vands fordampningsvarme, γ er psykrometerkonstanten, ρ_a luftens vægtfylde, c_p er luftens specifikke varmekapacitet, e_s og e_a er henholdsvis mættet og aktuel damptryk, og $f(u_2)$ er en empirisk vindfunktion, hvor u_2 er vindhastigheden målt i 2 m højde.

Forudsætningen for at ET_0 beregnes med stor nøjagtighed er at strålingselementerne og de øvrige meteorologiske elementer måles over den kortklippede og velvandede græsoverflade. De væsentlige omkostninger til udstyr der er forbundet med målingerne til denne metode samt krav til pasning af referencearealet har gjort at metoden ikke er blevet anvendt operationelt i et landsdækkende net, men alene ved forskningsinstitutioner som DJF og KVL.

Mikkelsen og Olesen (1991) anbefalede den modificerede Penman metode (ligning 6.2) til beregning af referencefordampningen under danske forhold.

$$ET_0 = \beta_{A0} + \beta_{A1} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_g}{\lambda} + \beta_{A2} \frac{\gamma \cdot f(u_2) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (6.2)$$

hvor betydningen af nettostrålingen R_n og jordvarmefluxen G er erstattet af globalstrålingen R_g og empiriske parameterfunktioner β . Denne metode er operationel, idet de indgå

ende variable indgår i måleprogrammet ved en lang række automatiske meteorologiske målestationer i Danmark.

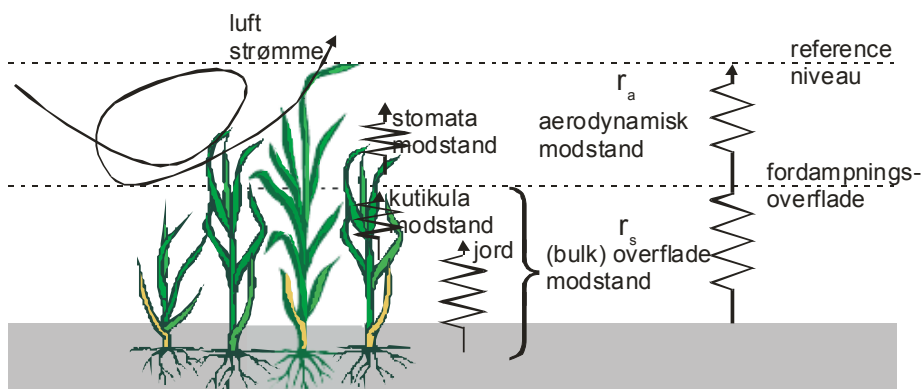
Senere har Detlefsen og Plauborg (2001) dog fundet at denne metode giver for lave værdier, formodentlig på grund af for usikre målinger af relativ luftfugtighed og vindhastighed. Forfatterne anbefalede i overensstemmelse med Plauborg et al. (2002) derfor en mere robust beregningsmetode Makkink (Makkink, 1957; Hansen, 1984) til operationel anvendelse indtil en forbedret kvalitet af de målte meteorologiske elementer kan stilles til rådighed.

$$ET_0 = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_g}{\lambda} \quad (6.3)$$

Der pågår p.t. som nævnt en udskiftning og teknisk opgradering af de meteorologiske målestationer i Danmark med henblik på en forbedring af måledataenes kvalitet. Dette muliggør i nær fremtid at igangsætte en analyse af muligheden for anvendelse af FAO versionen af Penman-Monteith ligningen (Monteith, 1965) til beregning af referencefordampningen.

$$ET_0 = \frac{\frac{\Delta}{\lambda}(R_n - G) + \frac{\rho_a}{\lambda} c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (6.4)$$

hvor r_s og r_a er henholdsvis afgrødemodstanden og den aerodynamiske modstand. Hovedelementerne i denne fysisk baserede model er skitseret i Fig. 6.6.



Figur 6.6 Hovedelementerne i Penman-Monteiths ligning til bestemmelse af referencefordampningen (efter Allen, 1998)

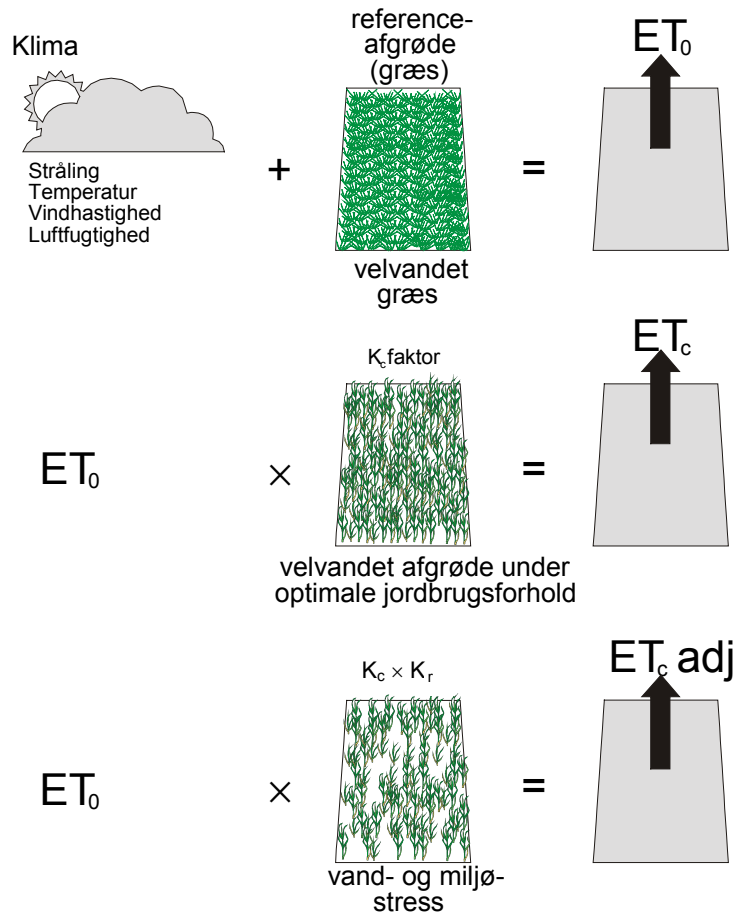
Denne metode har et betydeligt større potentiale end de øvrige, idet afgrødens regulering af fordampningen har fået en fysisk formulering ved inddragelse af afgrødemodstanden og den aerodynamiske modstand. I denne ligning indgår dog stadig strålingselementer der ikke måles operationelt samt krav om pasning af referenceoverfladen og derved fremstår metoden ikke operationelt.

Metoden er dog senest anbefalet som international standard for referencefordampning af både FAO og WMO, og der henvises til metoder til estimering af vanskeligt tilgængelige parametre såsom nettostrålingen og jordvarmefluxen (Allen, 1998). Endvidere foreslås pasningsproblemet af referencearealet løst ved at operere med en fiktiv græsoverflade med højden 0,12 m der betyder at afgrødemodstanden tildeles en fast værdi på ca. 70 s/m. Potentialet ved denne metode ligger desuden i at metoden er tilstrækkelig fysisk funderet til at kunne beregne potentiel og aktuel fordampning for mange typer overflader. Dette beror alene på om det i fremtiden er muligt at måle eller estimere samtlige parametre der indgår i ligningen. Der pågår derfor et betydeligt analysearbejde før denne metode vil være fundet velegnet til anvendelse under danske forhold.

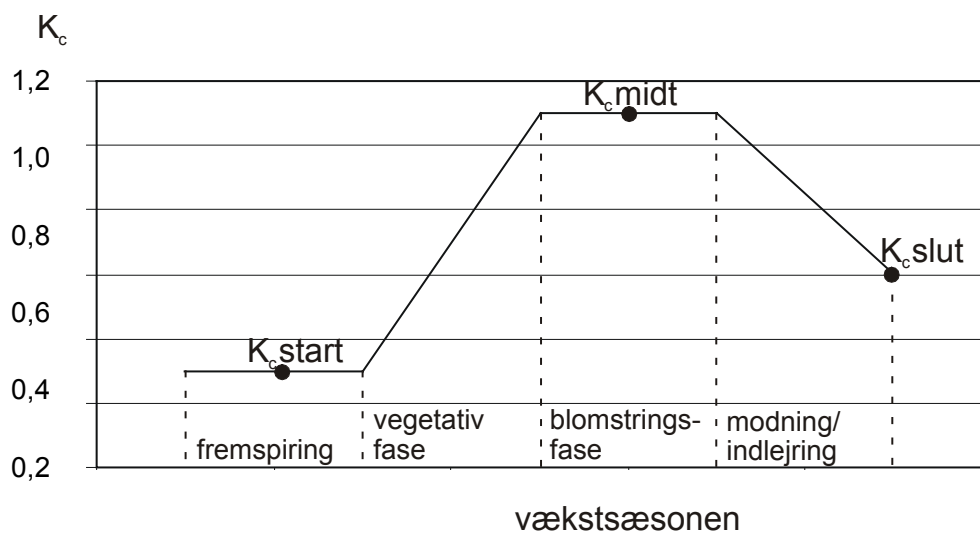
Til operationelle formål beregnes den aktuelle fordampning fra en given vegetation derfor stadig oftest med en model der benytter referencefordampning som input. Denne referencefordampning korrigeres med en afgrødekoeficient, der varierer med vegetationens udvikling. Med baggrund i det seneste analysearbejde der er foretaget af referencefordampning under danske forhold (Dettelsen og Plauborg, 2001) anbefales Makkink metoden (ligning 6.3) som den p.t. bedste metode til operationel beregning af referencefordampningen (Plauborg et al. 2002). Figurerne 6.7 og 6.8 skitserer anvendelsen referencefordampning og afgrødekoeficient og sidstnævntes tidlige udvikling for en vårafgrøde.

6.4.4 Fordampning fra mark, skov og vådområder

Aktuel fordampning er vanskelig at måle både på lille og stor skala og indgår oftest som en modelberegnet størrelse i vandbalanceopgørelser. Disse modelberegninger er ikke trivielle, idet aktuel fordampning afhænger dynamisk og ret så komplekst af mange parametre. Nye, men foreløbige forskningsresultater (Butts et al., 2001) viser, at anvendelsen af en detaljeret fysisk model, der inddrager uafhængigt bestemte mark-specifikke parameterfunktioner for både vegetation og jord, muliggør en beregning af aktuel fordampning på mark- og oplandsskala i en tidsskala mindre end et døgn med tilfredsstillende nøjagtighed. Så detaljerede model parametre er p.t. tilgængelige for kun ganske få vegetations- og jordtypekombinationer og aktuel fordampning beregnes derfor generelt i vandbalancesammenhænge med simple modeller (Kristensen and Jensen, 1975; Holst og Kristensen, 1981; Refsgaard, 1981; Aslyng og Hansen, 1982; Miljøstyrelsen, 1983; Olesen og Heidmann, 1990; Storm et al., 1990; Kemp & Lauritzen, 1991).



Figur 6.7 Princippet for anvendelse af afgrødekoefficienter, K_c , og reduktionsfaktor, K_r , sammen med referencefordampningen, ET_0 (efter Feddes et al., 1999)



Figur 6.8 Princippet for afgrødekoefficientens udvikling gennem en vækstsæson (efter Feddes et al., 1999)

I de generelt anvendelige, men simple, modeller beregnes aktuel fordampning oftest efter *principperne* opstillet i ligning 6.5. Det gælder modellerne Kristensen og Jensen (1975), Holst og Kristensen (1981), Refsgaard (1981), Aslyng og Hansen (1982), Storm et al. (1990) og Olesen og Heidmann (1990). Dog beregnes i Kemp & Lauritzen (1991) og i DK-modellen (Henriksen, 2002) efter en lidt anden formulering (ligning 6.6). Den største forskel på disse metoder er at ligning 6.5 explicit regner på de to processer; fordampning fra bar jord og fordampning fra vegetation, mens ligning 6.6 slår processerne sammen til én reduktionsfaktor. Herudover er der i de nyeste versioner af modellerne svarende til ligning 6.5 (Refsgaard, 1981; Aslyng og Hansen, 1982; Storm et al., 1990; og Olesen og Heidmann, 1990) taget explicit hensyn til interceperet nedbør.

$$ET_a = f(\phi, K_s, K_c(LAI), ET_0) \quad (6.5)$$

$$ET_a = f(\phi, ET_0) \quad (6.6)$$

hvor ET_0 er referencefordampningen (potentielt fordampning fra en kortklippet græs, der er velforsynet med vand); K_s er jordfordampningskoefficienten varierende mellem 0 og 1 afhængig af jordtype og jordvandindhold; K_c er afgrødekoefficienten, en funktion der afhænger af bladarealindekset (LAI) og som beskriver bladarealets betydning for fordampningens størrelse; og ϕ er en funktion, der beskriver jordvandindholdets betydning for fordampningen. Både funktionerne, der beskriver afhængigheden af afgrødeudviklingen og af vandindholdet antager værdier mellem 0 og 1. I disse simple modeller er således antaget at den aktuelle fordampning ikke kan overstige referencefordampningen.

Disse formuleringer af aktuel fordampning har i flere studier vist at give gode resultater både på markskala (Plauborg og Olesen, 1991, Plauborg et al., 1996) og oplandsskala, idet referencefordampningen på oplandsskala oftest er forudsat at være højere end potentielt fordampning fra kortklippet græs (eller K_c er større end 1) (Refsgaard, 1981; Aslyng og Hansen, 1982; Miljøstyrelsen, 1983; Storm et al., 1990). Dog er det flere gange påpeget i studier, at især den simple formulering af K_c kan medføre fejl i vandbalanceberegningerne (Clark et al., 1992., Allen, 1998), men også at formuleringen af ET_0 bidrager til en ikke ubetydelig usikkerhed (Aslyng og Hansen, 1982, Allen et al., 1994).

Flere internationale studier har vist at K_c for fuldt udviklede landbrugsafgrøder kan antage værdier på 1,1-1,2 (fx Feddes et al., 1999) og dermed under gode vandforsyningsforhold medføre en aktuel fordampning i denne periode, der er 10-20% større end referencefordampningen. Et niveau på 1,2 er dog ikke verificeret under danske forhold. Upublicerede danske studier for landbrugsafgrøder opererer med faktorer på 1-1,15. De fysiske sammenhænge, der udtrykt i denne koefficient er dog komplekse, idet K_c afhænger af afgrødens struktur, (bladareal og højde), vindhastigheden og indstrålingsniveauet.

For danske forhold vil nettostrålingen for flere fuldt udviklede landbrugsafgrøder kunne være op til ca. 20 % større end nettostrålingen for kortklippet græs (referenceoverflade), hvortil kommer større aerodynamisk ruhed. Der findes målinger af nettostråling over forskellige afgrøder se fx Aslyng, H.C. & Hansen, S. (1985). De i tabel 6.3 anførte maksimale værdier af afgrødekoefficienter for landbrugsafgrøder, forekommer derfor ikke at være for store, måske tværtimod (H.E. Jensen, personlig kommunikation).

For danske forhold er en afgrødekoefficient større end 1 især af betydning midt i vækstperioden i de situationer, hvor jordvandindholdet ikke begrænser fordampningen. Antagelsen i de simple modeller om at den aktuelle fordampning ikke kan overstige referencefordampningen medfører endvidere for danske forhold at den aktuelle fordampning for afgrøder med lang vækstsæson: roer, majs og sildige kartofler, og græs underestimeres i efteråret med måske i størrelsesorden 5-10%. Dette vil ligeledes gælde for vinterafgrøder med en afgrødestruktur, der er betydelig mere ru end referenceoverfladen, fx vinterraps.

Fordampningsforholdene for skov og vådområder er ikke velbelyste, men de seneste resultater for skov (Ladekarl, 2001) har vist at den aktuelle fordampning ligeledes her kan være betydelig større end referencefordampningen. I tidligere oplandsundersøgelser er der delvist taget højde for betydningen af nogle vegetationstypers store ruhed og for vegetation voksende i områder med højt liggende grundvandspejl. Afgrødekoefficienten er fx for skov sat til 1,1 i nogle af disse opgørelser.

Plauborg et al. (2002) anbefalede at erstatte den tidligere anvendte maksimumsværdi 1 for afgrødekoefficienten i simple vandbalancemodeller med maksimalværdier angivet i Tabel 6.3. I tabellen er disse maksimalværdier angivet som månedsværdier, men bør om muligt tilrettes i modellerne således at K_c er maksimal ved fuldt bladareal. Som nævnt kan K_c antage lavere værdier end den maksimale i perioden, hvor bladarealet er voksende eller aftagende henholdsvis efter fremspiring og under modning. Der er endvidere i tabel 6.3 angivet maksimumsværdier for overfladekoefficienten for (bar) jord til anvendelse i modeller, hvor fordampning er opdelt på jord og afgrøde.

Tabel 6.3 Nye månedlige maksimale værdier for overfladekoefficienter K_c for forskellige vegetationstyper (baseret delvist efter Feddes et al., 1999, tabel 6.7-1, p. 5-33). Der er angivet et interval for K_c for at dække forskellige arter indenfor en vegetationstype. Bemærk maksimal værdi for koefficienten (K_s) til skalering af referencefordampning for bar jord er angivet i første række. Tidslig variation i reference fordampning 1991-2000 / 1961-1990

Vegetationstype	Måned											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Fordampningskoefficient for jord, K_s	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1	1,0- 1,1
Vårafgrøder				1	1,0- 1,05	1,05- 1,15	1,05- 1,15	1				
Vårafgrøder med lang vækstsæson				1	1,0- 1,05	1,05- 1,15	1,05- 1,15	1,05- 1,1	1,05- 1,1	1,05- 1,1	1,05- 1,1	
Vinterafgrøder	1,0- 1,05	1,0- 1,05	1,0- 1,05	1,0- 1,05	1,0- 1,15	1,05- 1,15	1,0- 1,15	1				
Fuld etableret skov	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2	1,1- 1,2
Enge og vådområder	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

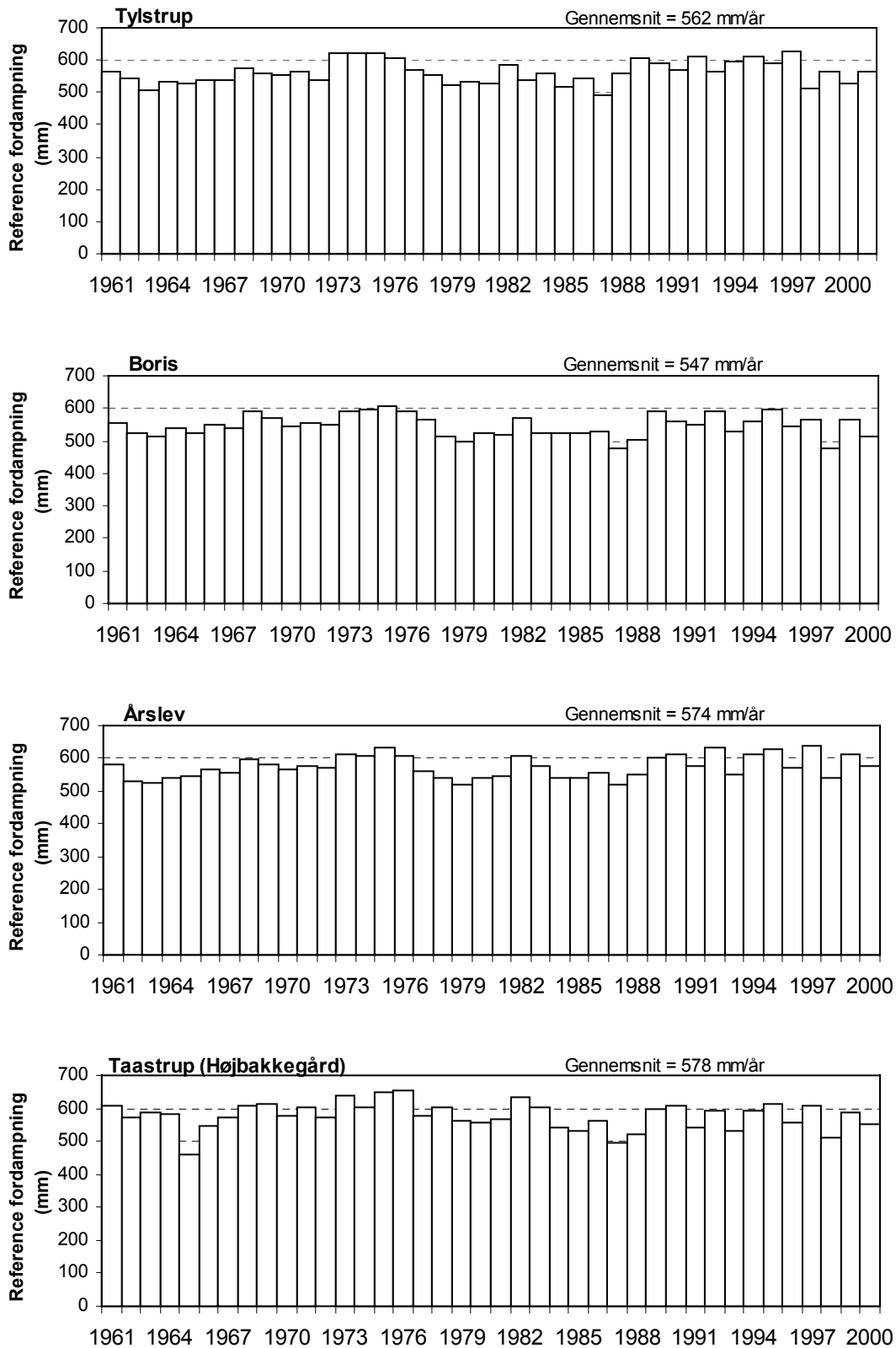
6.4.5 Tidslig variation i referencefordampning 1991-2000 / 1961-1990

Den tidslige variation i referencefordampning beregnet med Makkink's formel i perioden 1991-2000 sammenlignet med standard normalperioden 1961-1990 er illustreret på Figurerne 6.9 og 6.10 for fire lokaliteter: Tylstrup, Boris, Årslev og Taastrup (Højbakkegård). Klimadataene fra Taastrup er direkte målinger af de indgående klimavariabler fra KVL. For de tre øvrige stationer stammer dataene fra DJF. Dataene for globalstråling på DJF stationerne består af direkte målinger for perioden 1988-2000, mens dataene for globalstråling fra 1961 til 1988 er estimeret på baggrund af solskinstimer.

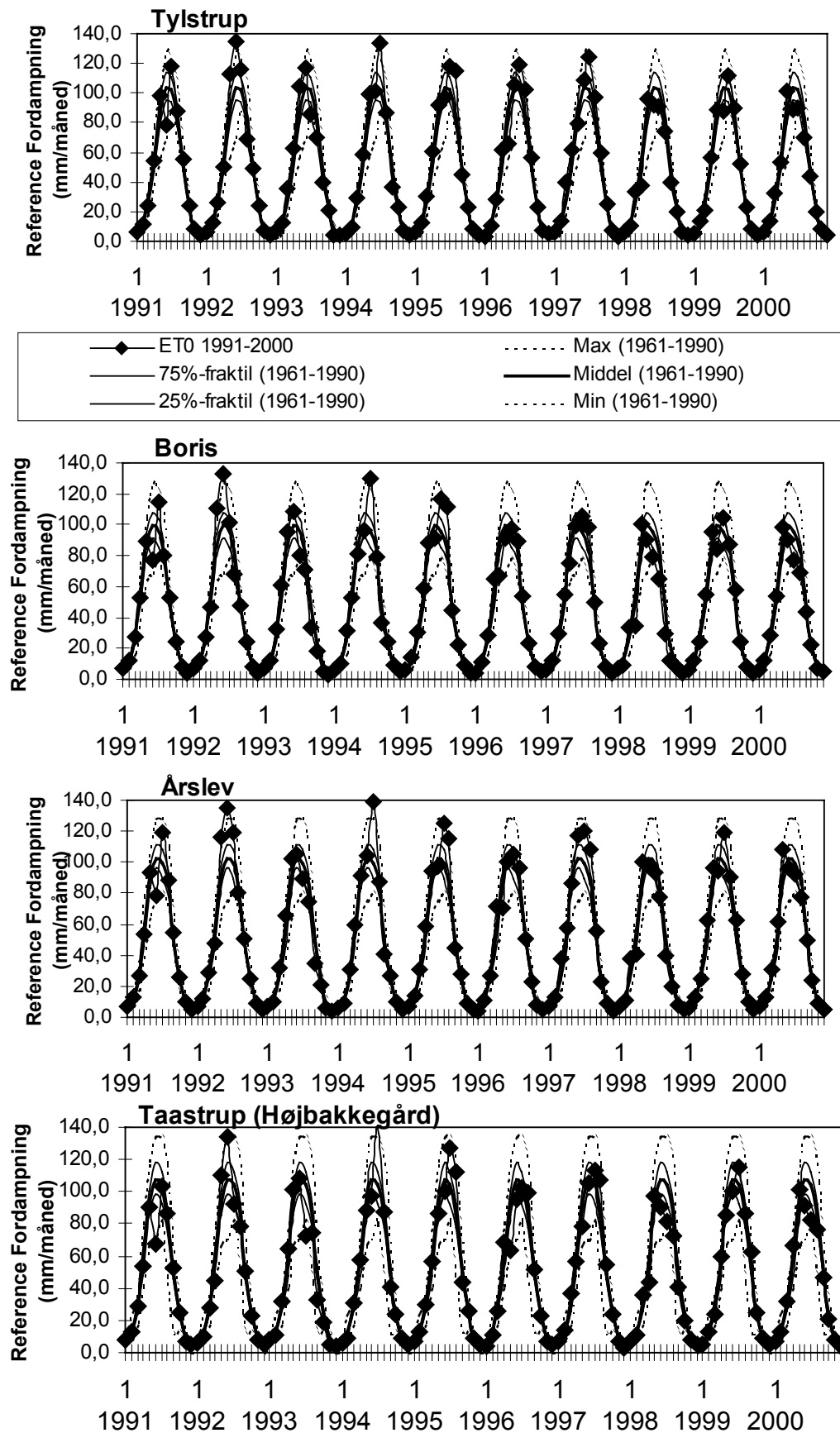
Sammenlignet med nedbøren ses variationerne i referencefordampning fra år til år at være lille. 10-året 1991-2000 ses ikke at afvige væsentlig fra normalperioden 1961-1990.

6.4.5 Usikkerhed på fordampning

Usikkerheden på den aktuelle fordampning estimeres til ca. 10% på årsbasis selv efter anvendelse af de seneste anbefalinger til beregning heraf. Flere faktorer bidrager til denne usikkerhed. Andre afgrødetyper har vundet indpas i jordbrugsproduktionen, især græs/kløvergræs og fodermajs i egne domineret af husdyrproduktion. Som tidligere nævnt er der behov for yderligere studier af aktuel fordampning for at opnå en forbedret parametrisering af de mere fysisk funderede metoder og dermed et mere præcis estimat for fordampningen. Endvidere tyder nye resultater på at afgrødernes roddybde generelt har været underestimeret, hvilket ensidigt kan bidrage til en undervurdering af den aktuelle fordampning på de bedre jorde og jorde med relativt højt beliggende grundvandsspejl. Prisstrukturen på salgsafgrøder har medført at markvanding er flyttet til færre afgrødetyper, bl.a. grovfoderafgrøder og højværdiafgrøder. Der mangler viden til justering af beregningen af den aktuelle fordampning fra afgrøder, der på grund af manglende vanding udsættes for kraftig vandstress.



Figur 6.9 Årlig beregnet reference fordampning beregnet med Makkinks formel for stationerne Tylstrup, Boris, Årslev, Taastrup 1961-2000. Data fra DJF og KVL.



Figur 6.10 Månedsværdier for reference fordampning (Makkink) for 1991-2000 sammenholdt med statistiske data for perioden 1961-1990. Data fra DJF og KVL.

6.5 Afstrømningsdata

6.5.1 Måling af afstrømning

Systematisk registrering af afstrømning i Danmark påbegyndtes omkring 1917. I dag findes næsten 400 målestationer, hvor afstrømningen måles kontinuerligt, og stationerne er fordelt i de omkring 64.000 km vandløb, der findes i landet. Det samlede opland til målestationerne udgør ca. 55 % af landets areal.

En hydrometrisk målestation består almindeligvis af en skalapæl til aflæsning af vandstand samt udstyr til automatisk kontinuerlig registrering af vandstanden. Ved stationen foretages med regelmæssige mellemrum måling af vandføringen, hvilket normalt foregår under anvendelse af propelinstrument. På baggrund af vandføringsmålingerne og de på samme tid observerede vandstande kan sammenhængen mellem vandstand og vandføring fastlægges. Herefter kan en kontinuerlig vandføringstidsserie (hydrograf) estimeres på basis af vandstandsregistreringen. I naturlige vandløb vil sammenhængen mellem vandstand og vandføring ændre sig med tiden, bl.a. på grund af grødevækst, sedimenttransport og vandløbsvedligeholdelse. Dette forhold må inddrages ved fastlæggelsen af sammenhængen mellem vandstand og vandføring.

6.5.2 Karakteristiske størrelser for afstrømningen

Der er store forskelle på afstrømningsmønstret i de danske vandløb. Nogle har en meget konstant afstrømning med lille forskel mellem vinter- og sommervandføring og uden særligt store stigninger f.eks. i forbindelse med kraftig nedbør. Andre har en meget varierende vandføring med stor afstrømning i nogle perioder og meget kraftig respons på nedbørsbegivenheder, og samtidig kan de være næsten udtørrede i sommerperioden.

Medianminimum er det afstrømningsniveau, der i gennemsnit bliver underskredet hvert 2. år (50%-fraktilen af årlige afstrømningsminima). Denne værdi anvendes ofte i Danmark til karakteristik af et vandløbs kritiske minimumafstrømning. Tilsvarende er medianmaksimum den afstrømning, der i gennemsnit overskrides hver 2. år. Eksempler på variationer i karakteristika for danske vandløb fremgår af Tabel 6.4, hvor data fra Lindholm Å i Nordjylland, Skjern Å i Vestjylland, Odense Å på Fyn og Tryggevælde Å på Sjælland er angivet.

Tabel 6.4 Karakteristiske afstrømningsværdier for 4 vandløb for perioden 1961 – 2000. Data er angivet i l/s/km² (for middel også i mm/år).

	Lindholm Å	Skjern Å	Odense Å	Tryggevælde Å
Medianminimum	1,0	8,0	1,7	0,4
middel (mm/år)	8,9 280	15,0 473	9,9 312	7,2 226
medianmaksimum	43,4	40,8	51,8	64,5

6.5.3 Betydning af medianminimumafstrømning og variation for økologiske forhold

Den biologiske vandkvalitet er generelt dårligst i vandløb med den største variation i vandføringen og i vandløb med meget lav minimumvandføring (Ovesen et al., 2000). Det er dog ikke konstateret, om denne sammenhæng skyldes at variationerne i vandføringen har direkte betydning for smådyrsfaunaen eller om den skyldes andre faktorer, der både er korrelerede med afstrømningsforhold og den biologiske vandløbskvalitet. Dette kan f.eks. være tilfældet med koncentrationen af organisk stof og andre kemiske stoffer.

6.5.4 Tidslige variationer i afstrømning for 1991-2000 / 1961-1990

Perioden 1991 – 2000 har været præget af relativt store variationer i afstrømningsmængden. Således er der for mange stationer både optrådt det år med størst (1994) og det år med mindst (1996) afstrømning, der hidtil er registreret, jf. Fig. 6.11. I de vandløb, hvor der er størst variation i vandføringen er der ca. en faktor 3 til forskel på år med meget ringe hhv. meget stor afstrømning. I vandløb, der er domineret af tilløb fra store grundvandsmagasiner, f.eks. Skjern Å, er forskellen ikke så udpræget. Til gengæld ses der i disse vandløb en betydelig forsinkelse i afstrømningens respons på nedbøren, hvilket kan ses ved at sammenholde Fig. 6.4 og Fig. 6.11. Det enkelte års afstrømning er her i høj grad afhængig af det foregående års nedbørmængde.

Middelfafstrømningen er generelt lidt større i perioden 1991 – 2000 end i normalperioden 1961 – 1990. For de 4 målestationer i Lindholm, Skjern, Odense og Tryggevælde Å er forøgelsen på henholdsvis 2, 0, 4 og 5 %. Tilsvarende kan der konstateres en forøgelse i nedbørmængderne jf. afsnit 6.3.3.

Årsmiddelfafstrømningen udviser en stigende udviklingstendens siden 1917 på de fleste danske målestationer (Ovesen et al., 2000). Der findes også enkelte stationer, hvor udviklingen har en negativ trend, men sammenfattende er tendensen, at årsmiddelfafstrømningen er blevet større siden 1917. Antallet af målestationer med signifikant udvikling er dog ikke stort nok til at der kan foretages en regionalisering af udviklingstendenserne. De generelt set stigende udviklingstendenser i årsmiddelfafstrømningen kan primært relateres til de stigende nedbørmængder, men også de øvrige parametre i vandbalancen har indflydelse på udviklingen.

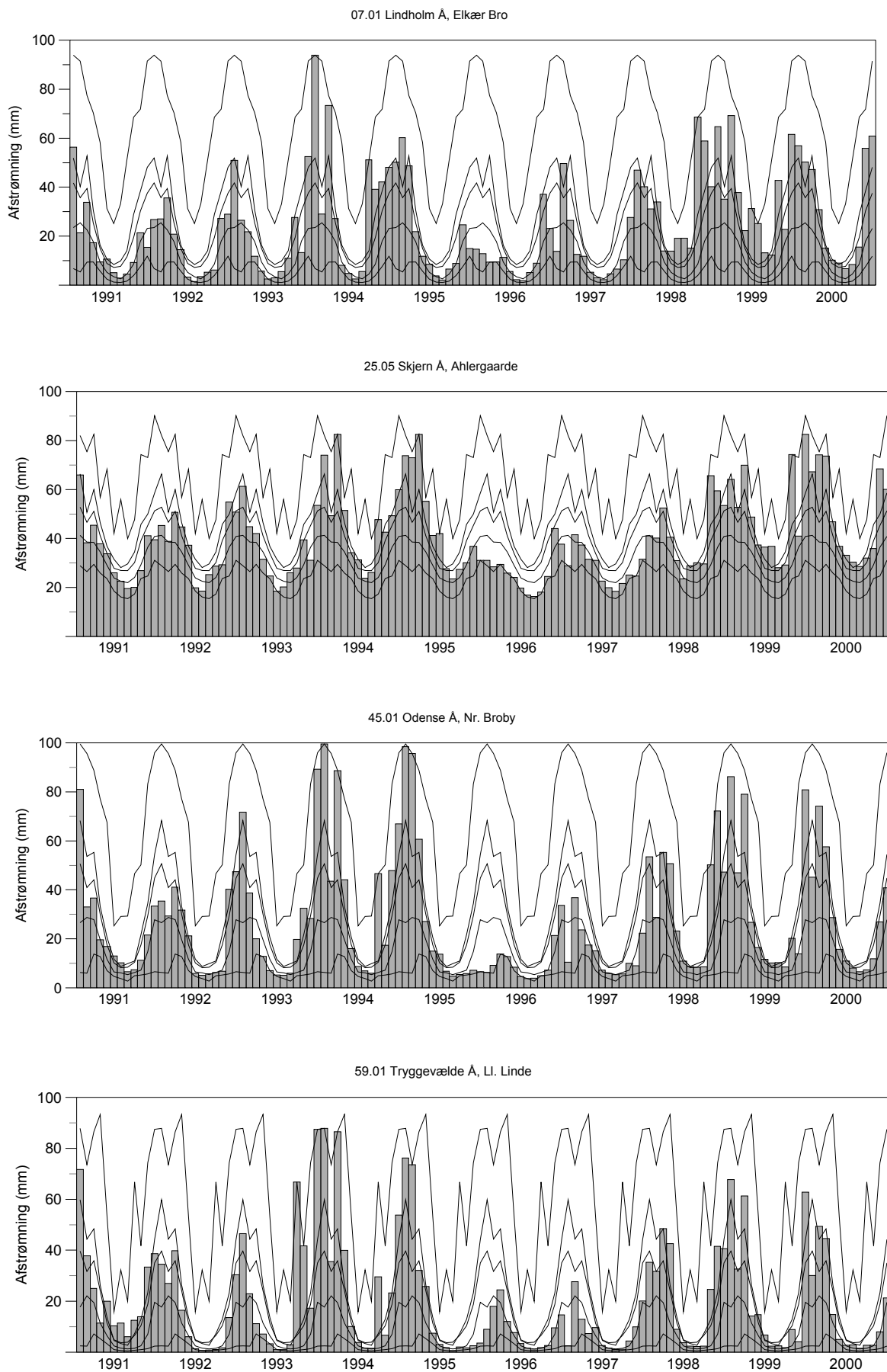


Fig 6.12 Månedafstrømning 1991 – 2000 (stolper) med angivelse af maksimum, 75%-fraktil, middel, 25%-fraktil og minimum for perioden 1961 – 1990. Data og figurer fra DMU.

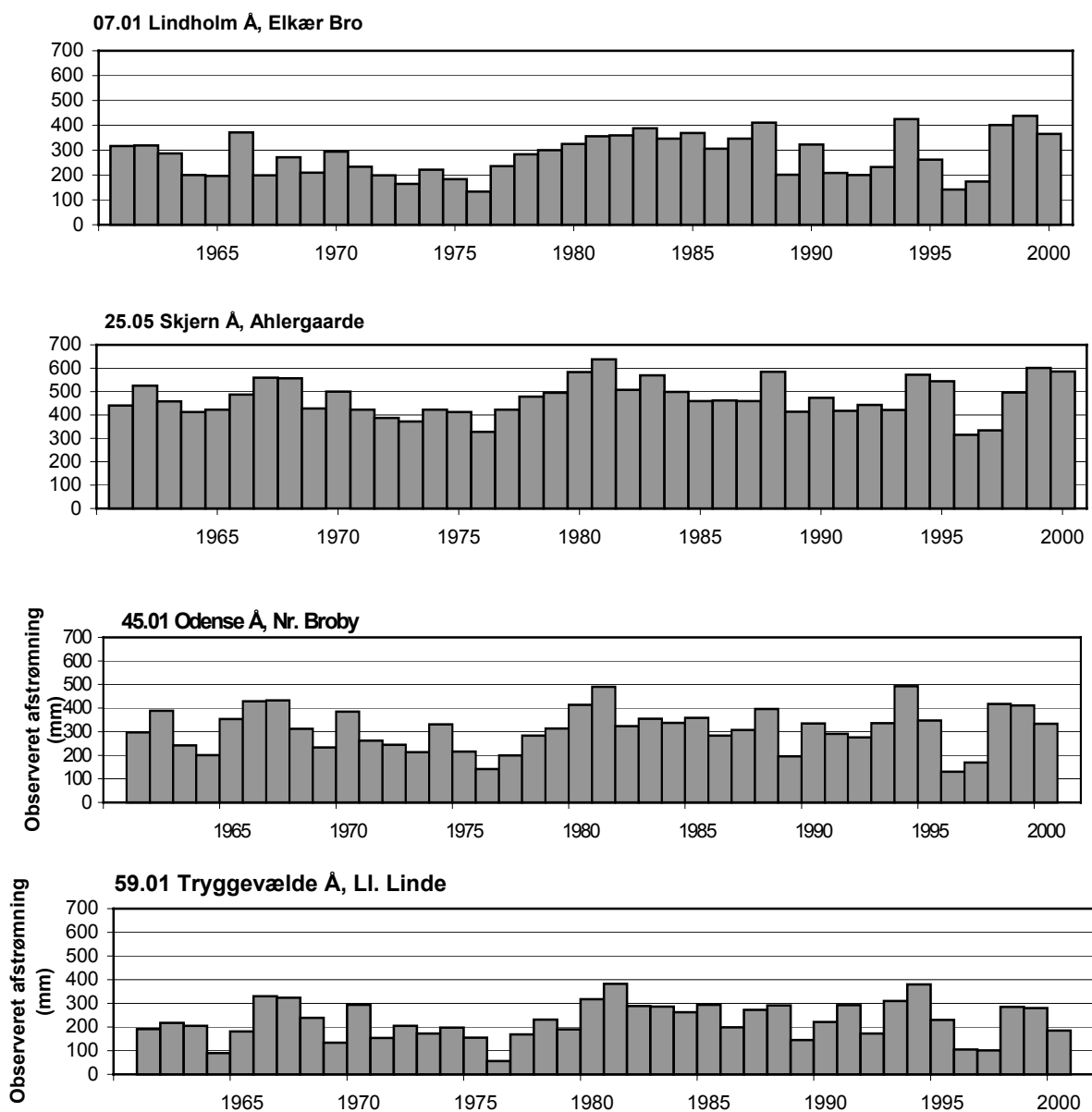


Fig. 6.11 Årsmiddelfafstrømning (mm) 1961 – 2000. Data og figurer fra DMU.

6.5.5 Usikkerhed på afstrømningsmålinger

Analyser af usikkerhed på enkeltmålinger af vandføring med vingeinstrument angiver en gennemsnitlig værdi på 5 % på 95%-konfidens niveau, *Herschy (1999)*. Denne usikkerhed kan antages gældende, når målingerne er udført i overensstemmelse med retningslinier i gældende ISO-standarder, hvilket er normal praksis i Danmark..Vandføringerne bliver som regel estimeret ud fra vandstandsmålinger og sammenhængen mellem vandstand og vandføring (Q-h kurven). Q-h kurven genererer også usikkerhed, hvorfor usikkerhederne på døgnværdierne fra målestationerne må skønnes til at være af størrelsesorden 5-10%.

Usikkerhederne på årsafstrømningen vil være lavere, men på grund af mulige systematiske fejl kan den dog ikke forventes at være væsentlig lavere end 5%.

Usikkerheden på afstrømningsdata er afhængig af den enkelte målestation. F.eks. vil der være en forøget usikkerhed for meget små målestationer. Der kan være flere årsager til forøget usikkerhed på afstrømningsregistreringen, hvoraf følgende er almindeligt forekommende:

- Stuvningspåvirkning, eksempelvis på grund af nedstrøms liggende sø eller hav, grøde eller for lille bundhældning.
- Ændring af vandløbstværsnit som følge af hyppig opgravning, grødevækst, sandvanding eller lignende.
- Grundvandsdomineret afstrømningsregime, hvor alle vandføringsmålinger ligger inden for et snævert interval.

6.6 Vandspejlsvariationer i grundvand

6.6.1 Måling af grundvandstand i det nationale pejlestationsnet

Det nationale grundvandspejlestationsnet blev startet i begyndelsen af 1950'erne af GEUS. De anvendte pejleboringer var hovedsageligt husholdningsboringer og vandværksboringer, boringer med begrænset indvinding eller boringer som ikke var i brug længere. Stationsnettet blev gradvist udvidet gennem de følgende år, og med inddragelsen af deciderede pejleboringer fra den IHD og IHP undersøgelserne (Karup og Suså områderne) samt Nordvandprojektet var stationsnettet oppe på over 150 boringer i 1980'erne. Boringerne blev pejlet 1 eller 2 gange pr. måned af en lokal pejlemedarbejder, som udfyldte pejlekort der løbende blev sendt til GEUS. Desuden fandtes 10 - 15 boringer med pejlere, som kontinuert registrerede ændringer i grundvandspejlet.

Fra 1997 til 2002 er der gennemført en revision og modernisering af det nationale pejlestationsnet. De lokale pejlemedarbejdere er afløst af dataloggere til registrering af grundvandsstanden, og der er sket en reduktion og forbedret geografisk fordeling af pejleboringerne. Stationsnettet består i dag af 10 on-line stationer, hvor data hentes hjem via telefonnettet (fastnet og mobil), og 45 boringer udstyret med dataloggere, hvor data hentes hjem 1 - 2 gange årligt. Grundvandsstanden registreres 1 - 4 gange i døgnet, og data lagres i GEUS's Jupiter-database.

En række amter driver egne pejlestationsnet, og som en del af det nationale grundvandsovervågningsprogram foretager amterne målinger grundvandsstanden i flere hundrede overvågningsboringer. Derudover foretager landets større vandforsyninger regelmæssigt målinger af grundvandsstanden i deres vandindvindingsområder.

6.6.2 Tidslig variation i grundvandsstand

I Fig. 6.13 ses eksempler på tidslige variationer i grundvandsstanden fra 4 lokaliteter: Karup, Løgumkloster, Vejstrup og Klarskov. Boringerne i Karup og Løgumkloster er filtersat i øvre frie sandmagasiner henholdsvis 9 og 4 meter under terræn. Boringen i Vejstrup er filtersat 26 meter under terræn i et sandmagasin med frit vandspejl. I Klarskov er boringen filtersat i skivekridt 29 meter under terræn, dette magasin er artesisk.

Alle fire boringer viser årstidsvariationer i vandspejlet. Boringerne i Karup, Vejstrup og Klarskov viser desuden langperiodiske tendenser i vandspejlsvariationerne med lave niveauer i sidste halvdel af 1970'erne og 1990'erne, og høje niveauer i første halvdel af 1980'erne og i 1994-95. Ved boringen i Løgumkloster, som i modsætning til den anden boring med filtersætning i det øverste frie grundvandsmagasin (Karup) er beliggende tæt på et vandløb, ses de langperiodiske vandspejlsvariationer stort set ikke.

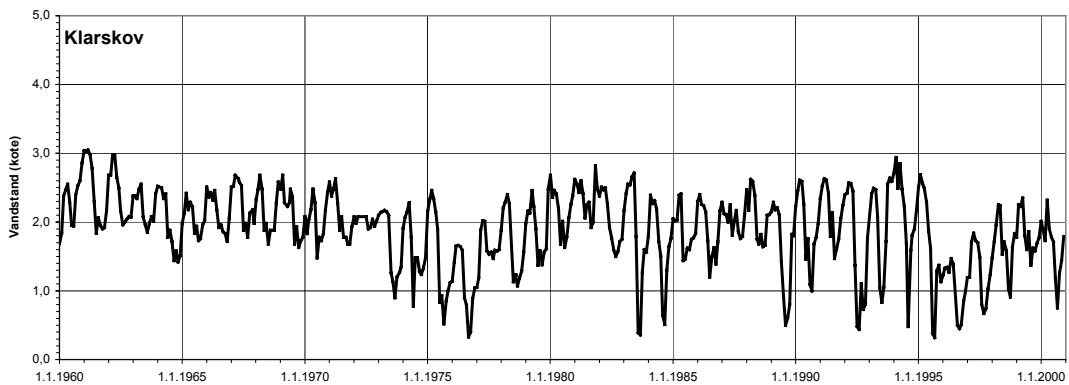
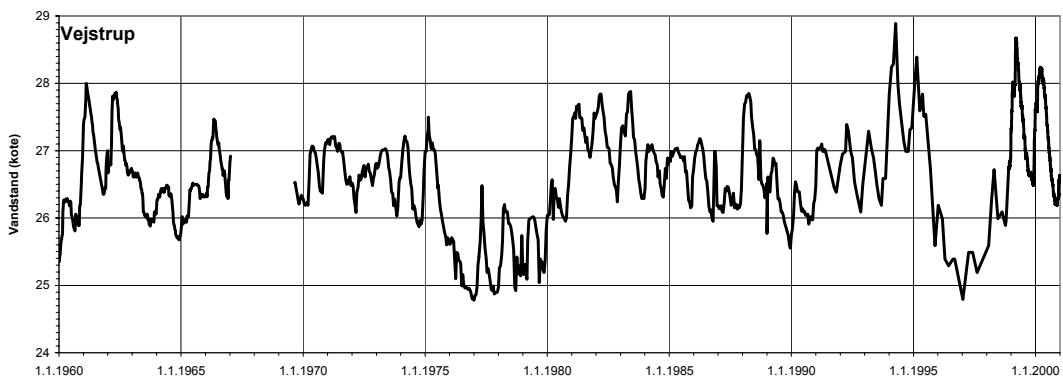
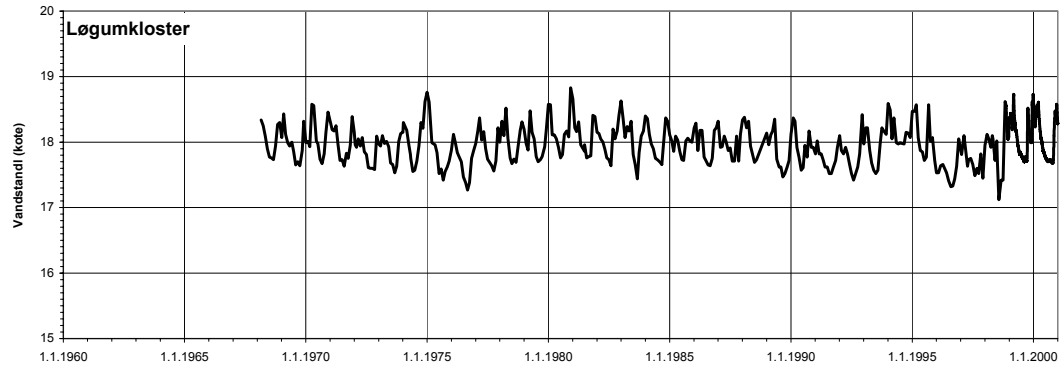
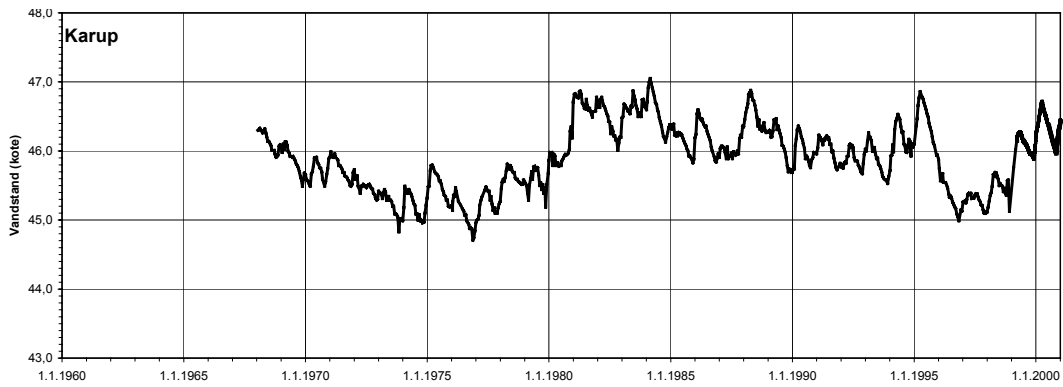
6.6.3 Usikkerhed på pejledata

Den direkte måleusikkerhed på håndpejlinger af grundvandsstanden er ca. 1 cm for en kyndig person med velfungerende udstyr. Usikkerheder på 5 - 10 cm er set især for enkelte lokale pejlemedarbejdere, ligesom målinger med '1-meter-fejl' er indberettet til GEUS, om ikke hyppigt så dog jævnligt.

Generelt er der også en usikkerhed på ca. 1 cm ved vandstandsmålinger med standard automatisk udstyr. Derudover kan der forekomme en 'drift' på målinger med automatisk udstyr, dvs. at afvigelsen fra den korrekte grundvandstand er jævnt stigende over måleperioden.

Andre, og ofte væsentligere, usikkerheder på pejledata er:

- En boring kan eventuelt 'kortslutte' flere grundvandsmagasiner.
- Pejleboringen kan være påvirket af en nærliggende indvindingsboring. Der kan i visse tilfælde være manglende kendskab hertil.
- Barometerstanden kan påvirke grundvandets trykniveau.
- Den målte grundvandsstand kan i visse situationer repræsentere et helt lokalt grundvandsspejl i stedet for et regionalt niveau.
- Pejledata er punktobservationer, hvis repræsentativitet for et større område afhænger af grundvandsspejlets stedlige variation. Når pejledata sammenlignes med trykniveauer beregnet af grundvandsmodeller, vil denne usikkerhed ofte være den dominerende. En punktmålings repræsentativitet i forhold til eksempelvis trykniveauer simuleret i et 1 km² beregningsnet vil således typisk være karakteriseret ved en usikkerhed af størrelsesordenen 2-3 m (Sonnenborg, 2001).
- Grundvandstanden ses at variere meget i tid, både inden for et år, og i nogle grundvandsmagasiner desuden mellem tørre år og våde år. Det betyder, at et stationært grundvandsspejl ikke eksisterer i virkeligheden, samt at det kan være meget problematisk at estimere et repræsentativt billede af et (quasi)stationært grundvandsspejl. Endvidere betyder det, at interpolation i tid mellem forskellige punktobservationer med det formål at danne et billede af grundvandsspejlet kan forårsage betydelige usikkerheder.



Figur 6.13 Fluktuationer i grundvandsstanden fra 4 lokaliteter: Karup, Løgumkloster, Vejstrup og Klarskov.

6.7 Vandindvinding

6.7.1 Måling af oppumpede vandmængder og fordeling på enkeltboringer

Måling af oppumpede vandmængder foretages normalt med vandmålere/vandure på vandværker og ved industriindvindinger. For markvandingsboringer opgøres vandforbruget normalt ud fra strømforbruget.

I følge 'Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg' (BEK nr. 871 af 21/09/2001) skal ejeren af et indvindingsanlæg med en årlig tilladt indvinding på under 100.000 m³ opgøre vandforbruget ved begyndelsen af hvert år, for anlæg med en årlig tilladt indvinding på 100.000-350.000 m³ ved begyndelsen af hvert kvartal, og for anlæg med en årlig tilladt indvinding på over 350.000 m³ ved begyndelsen af hver måned.

For indvindingsanlæg med mere end en produktionsboring er det meget udbredt at registrere den samlede oppumpning for anlægget, og ikke oppumpningen pr. boring. For enkeltanlæg og anlæg som forsyner op til 9 husstande foretages normalt et skøn over den oppumpede vandmængde ved udarbejdelse af vandforsyningsstatistikker.

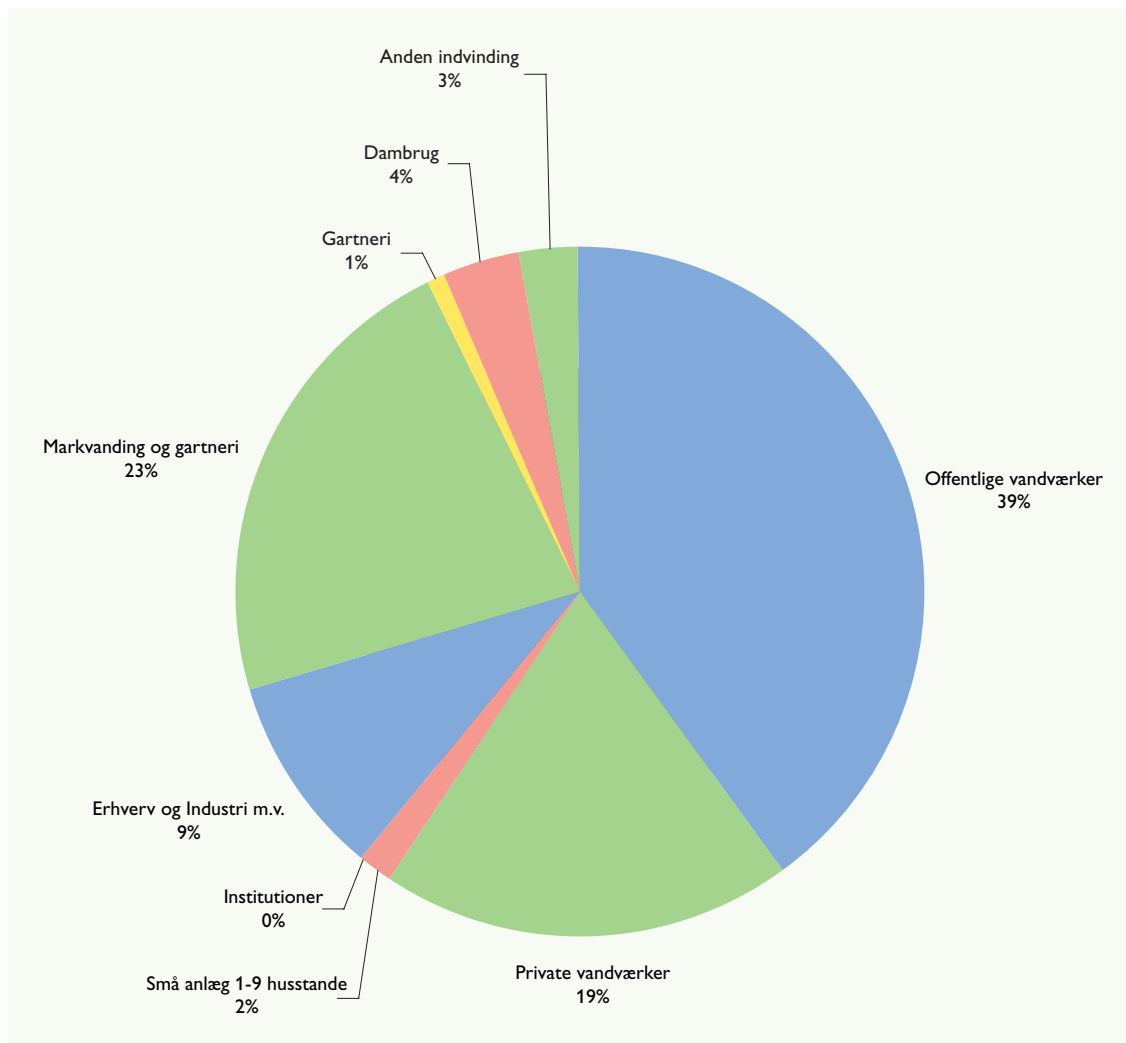
6.7.2 Vandindvindingsstatistik og fordeling på forbrugskategorier

Vandindvindingen i Danmark er altovervejende baseret på grundvand, mere end 99% af vandet hentes fra grundvandsmagasiner. Drikkevandsforsyningen i Danmark er bygget op omkring en decentral struktur med ca. 2800 almene vandforsyninger, heraf er 166 offentlige fællesanlæg (DVF et al., 2000). Derudover findes en række lokale vandforsyninger til bl.a. institutioner, industri, markvanding, sportspladser, gartneri og dambrug samt såkaldte enkelt-vandforsyninger som hver forsyner 1-9 til husstande.

De indvundne grundvandsmængder er her for 2000 opgjort i følgende 9 kategorier:

- offentlige almene vandværker,
- private almene vandværker,
- små ikke almene anlæg (1-9 husstande),
- institutioner med egen indvinding,
- erhverv/industri med egen indvinding,
- oppumpning af vand til markvanding
- oppumpning af vand til gartneri,
- oppumpning af vand til dambrug,
- anden indvinding, bl.a. grundvandssænkninger og afværgepumpninger.

De indvundne vandmængder fra kategorierne 3 og 9 er ofte skønnede. Ofte kan der også ligge skøn til grund for den samlede markvandingsmængde, da der ofte mangler indberetninger om aktuel markvanding fra en mindre del af de givne tilladelser. Desuden skal det bemærkes at kategorierne ikke er helt entydige, f.eks. forsynes mange industrier fra almene vandværker.



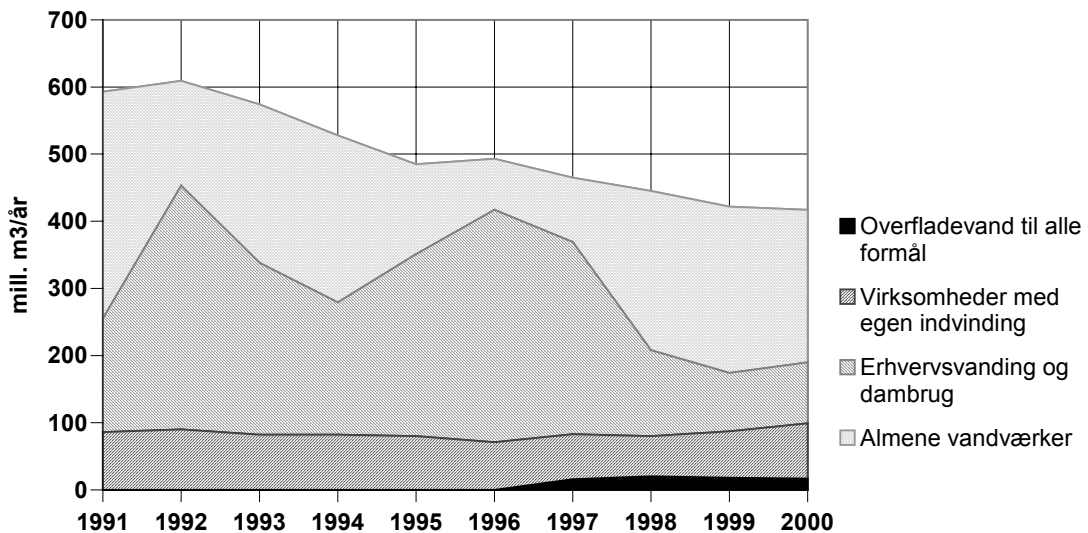
Figur 6.14 Indvundne vandmængder i Danmark i 2000 fordelt på 9 forbrugskategorier

6.7.3 Den tidslige udvikling i vandforbrug til markvanding, vandværker og industri

Indvindingen fra vandværker, den almene vandforsyning, udgør 59% af den samlede indvinding. Den almene vandforsyning og oppumpning af grundvand til markvanding, gartneri og dambrug tegner sig for 86% af grundvandsindvindingen i Danmark (Fig. 6.14).

På grundlag af indberettede data er der foretaget en opgørelse for hele landet på fire hovedkategorier (Fig. 6.15 og Tabel 6.5):

- Almene vandværker: offentlige og private enkeltanlæg.
- Erhvervsvanding: markvanding, gartneri og dambrug.
- Industri mv.: erhverv, industri, institutioner, afværgepumpninger, grundvands-sænkninger, enkeltindvindinger til husholdninger og anden grundvandsindvinding.
- Overfladevand.



Figur 6.15 Vandindvinding i Danmark (mill. m³/år) fordelt på indvindingskategorier baseret på indberetninger til GEUS og oplysninger fra amternes overvågningsrapporter for perioden 1991-2000. Der er ingen opgørelse af indvinding af overfladevand før 1997.

I figur 6.15 er vist vandindvindingen opgjort på fire hovedkategorier for perioden 1989-2000. Den totale grundvandsindvinding i 2000 var på 706 mill. m³, og indvindingen af overfladevand var på over 17 mill. m³. Faldet i de almene vandværkers vandindvinding er stagneret i 2000 i forhold til de foregående år. For perioden som helhed fra 1989 til 2000 er der sket et fald på 34% i denne indvinding. De mere normale nedbørsforhold i 2000 i forhold til den våde sommer i 1999 har betydet at vandindvindingen til markvanding og gartneri er steget lidt igen, uden dog tilnærmelsesvis at have nået et omfang som i 1992 og 1996/97. I 2000 har vandforbruget til markvanding og gartneri været 5% højere end i 1999, hvor forbruget var det laveste i 10 år.

Grundvandsindvindingen fra virksomheder med egne borer er steget med 8% fra 1999 til 2000, og udgør nu 9% af den samlede grundvandsindvinding, eller 65,6 mio. m³/år. Op-pumpninger i forbindelse med større anlægsprojekter (Københavns Metro) og afværgeforanstaltninger er steget med 2 mio. m³ fra 1999 til 2000 og udgør nu 19,1 mio. m³/år.

Tabel 6.5 Vandindvinding i 2000 fordelt på 4 hovedkategorier for landets amter samt Københavns og Frederiksberg kommuner (i.o. = ingen oplysninger).

	Vandværker	Erhvervsvanding	Industri mv.	Overfladevand
	mill. m ³ /år			
Københavns amt	37,537	0,168	11,078	i.o.
Roskilde	34,162	0,510	7,122	i.o.
Kbh. og Fr:berg komm.	2,442	0,000	5,466	1,100
Frederiksborg	38,153	0,959	2,123	1,107
Vestsjælland	32,640	1,026	2,077	5,600
Storstrøm	18,327	0,955	3,184	i.o.
Bornholm	4,029	0,044	0,036	i.o.
Fyn	37,671	3,154	2,757	2,538
Sønderjylland	23,086	29,782	12,003	1,740
Ribe	22,082	44,298	3,164	i.o.
Vejle	28,941	11,500	18,280	i.o.
Ringkjøbing	27,580	64,463	10,500	3,826
Århus	47,345	4,801	4,098	1,000
Viborg	21,689	7,574	5,777	i.o.
Nordjylland	41,221	20,856	11,468	0,106
I alt på landsplan	416,905	190,090	99,113	17,017

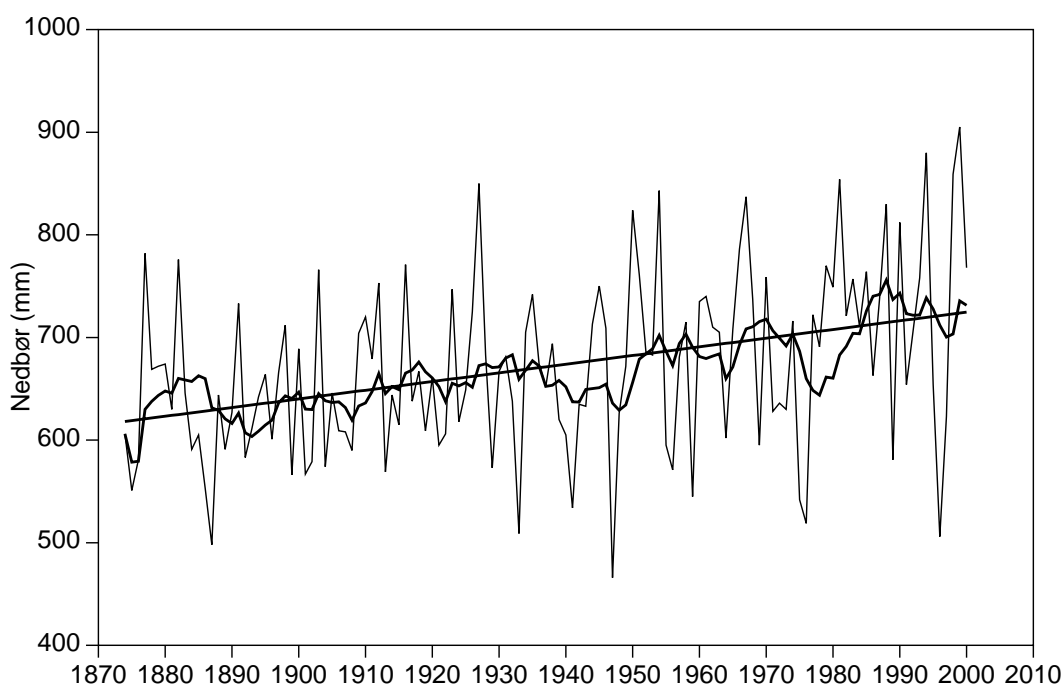
6.7.4 Usikkerhed på vandindvindingsdata

De væsentligste usikkerhedskilder på vandindvindingsdata er følgende:

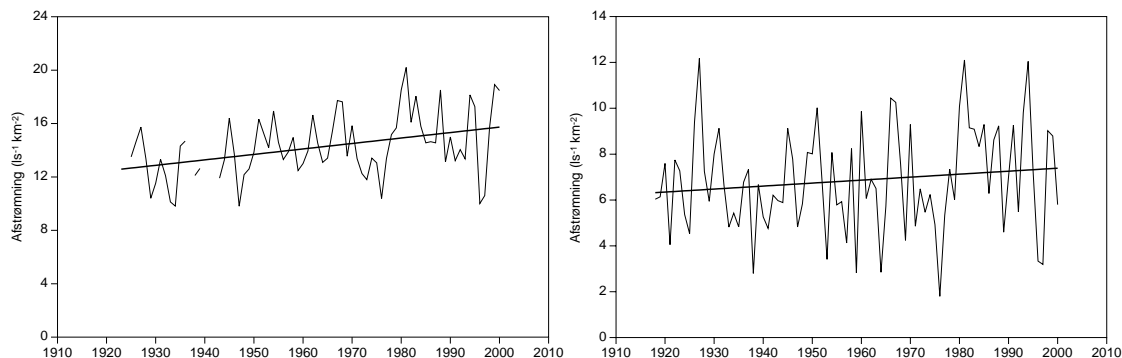
- Vandindvindingsdataene er opgjort på kildepladsniveau. Ved kildepladser med flere filtre kan der derfor være tvivl om fordelingen af indvindingen på boringer og, i de tilfælde hvor filtrene ikke alle ligger i det samme magasin, på magasiner.
- Manglende indberetninger fra kommuner (bagud i tiden) har i visse tilfælde været en kilde til usikkerhed. Ofte har amterne i sådanne tilfælde skønnet det faktuelle forbrug. Indberetningerne er dog betydelig sikrere efter indførelse af gebyr på vandindvindings-tilladelsen og det faktuelle forbrug.
- Markvandingsforbruget er ikke opgjort med samme nøjagtighed som de øvrige data. Det skyldes dels at der ikke er vandmålere på alle indvindinger, og dels at indberetningerne ikke opnås fra 100% af forbrugerne, hvorfor forbruget fra de resterende må skønnes (af amterne).
- Indvindinger fra små anlæg (< 9 husholdninger) er ikke indberettede. Betydningen af denne usikkerhed er dog i de fleste sammenhænge uvæsentlig.

6.8 Vurdering af perioden 1991-2000 i forhold til længere tids-serier

Resultaterne i nærværende rapport er baseret på aktuelle klimatiske data fra perioden 1991-2000. I de tidligere afsnit i dette kapitel er der endvidere vist tidsserier tilbage til 1961. Set i lyset af de aktuelle diskussioner af fremtidige klimaændringers betydning for bl.a. vandressourcerne kan det være interessant at betragte nogle længere historiske tidsserier. Nedenstående figurer 6.16 og 6.17 med eksempler på de længste eksisterende tidsserier for henholdsvis målt nedbør og afstrømning skal ses i det perspektiv.



Figur 6.16 Tidsserie med årlig nedbør for Danmark i perioden 1874 – 2000 med den bedste rette linie og 10 års glidende gennemsnit. Data fra DMI. Figur modificeret efter Ovesen et al. (2000).

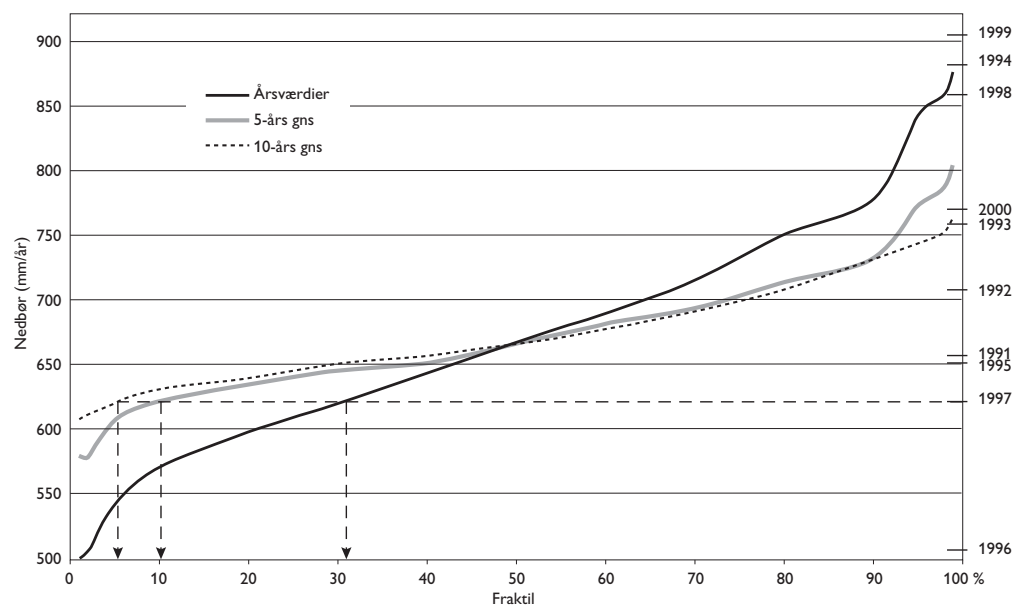


Figur 6.17 Tidsserier med årlig middelaflstrømning for Skjern Å, Ahlergaarde 1917-2000 (tv) og Tryggevejle Å, LI. Linde 1918-2000 (th). Figur modificeret efter Ovesen et al. (2000).

På figur 6.18 er vist den statistiske fordeling af nedbørstidsserien 1874-2000, dels med de årlige værdier og dels med nedbørsserien udjævnet med henholdsvis 5-års og 10-års glidende gennemsnit. Samtidig er de ti års nedbør fra 1991-2000 angivet på figuren.

Fra figurene ses ligesom på de øvrige figurer med tidsserier (Figs 6.4, 6.9, 6.11 og 6.13) tre generelle tendenser:

- Der er en betydelig variation fra år til år, specielt i nedbøren, men også i afstrømningen.
- Der er langperiodiske variationer med sekvenser af tørre henholdsvis våde år.
- Der er i mange af tidsserierne en tendens til stigende nedbør og afstrømning gennem forrige århundrede. Denne tendens er ikke statistisk signifikant i alle tidsserier, men dog generelt markant. Gennemsnitsnedbøren for 1874-2000 er således på 673 mm/år, mens gennemsnittet for 1991-2000 er 731 mm/år, dvs 9% højere.



Figur 6.18 Fordelingen af nedbør fra perioden 1874-2000 som årsværdier, 5-års og 10-års glidende gennemsnit.

Ved en sammenligning af perioden 1991-2000 med de længere tidsserier kan følgende forhold bemærkes:

- 1991-2000 indeholder betydelige korttidsvariationer med våde og tørre år, som er mere sjældne end forventelig i en tiårs periode. Der er således store variationer med et enkelt meget tørt år (1996) og tre meget våde år (1994, 1998 og 1999). Det tørre år ligger på niveau med de tørre år som optræder med en gentagelsesperiode på ca. 50 år (2% fraktil). De tre våde år er de vådeste i hele den historiske tidsserie.
- Det gennemsnitlige niveau for nedbør og afstrømning i perioden 1991-2000 er, sammen med bl.a. 1980'erne, en tiårsperiode med den højeste registrerede nedbør og afstrømning. Til sammenligning var nedbøren i perioden i slutningen af 1800-tallet 15% lavere. De tilsvarende forskelle i vinternedbøren, som er afgørende for grundvandsdannelsen er af Thomsen (1990) estimeret til ca. 20% for store dele af Vesteuropa, inklusive Danmark.

- Vinternedbøren i perioden 1991-2000 var højere end vinternedbøren for perioden 1961-1990. I det hele taget har vinternedbøren siden 1961 været højere end i tidligere årtier. Eftersom specielt vinternedbøren er afgørende for grundvandsdannelsen har det i anden sammenhæng været besluttet, at amternes opgørelse af den klimakorrigerede vandressource skal foregå ved at anvende en korrektion med en faktor 0,7 (Thomsen, 1998).

I modelberegningerne (Kapitel 7) er der foretaget beregninger baseret på klimaforholdene i de enkelte år i perioden 1991-2000. Som eksempel på karakterisering af to år som er henholdsvis lidt mere vådt og lidt mere tørt end et gennemsnitsår kan nævnes 1993 og 1997. Nedbøren i 1993 er på landsplan således 4% højere end gennemsnittet for perioden 1991-2000 og 13 % højere end i 1874-2000, men 16% lavere end nedbøren i det vådeste år i perioden, som var 1999. Tilsvarende er nedbøren i 1997 15% lavere end gennemsnittet for 1991-2000 og 8% lavere end i 1874-2000, men 23% højere end det tørreste år, 1996. 1993 og 1997 er således ikke i sig selv exceptionelt våde eller tørre, men svarer ca. til henholdsvis 30% (\approx 3 års hændelse) og 85 % (\approx 6 års hændelse) fraktilerne i de årlige nedbør.

I nogle af beregningerne benyttes grundvandsmodellen i en såkaldt stationær version, dvs. uden tidsvarierende klimainput. Effekten af at benytte klimadata fra et tørt år som fx 1997 med en gentagelsesperiode på 3 år (svarende til at i gennemsnit hvert tredje år er mindst lige så tørt) er dog meget større ved en stationær model, fordi grundvandssystemet tager mange år om at respondere fuldt ud på ændret klima. Denne modererende indflydelse kan ses ved at sammenligne tidsserierne for nedbør med figuren med grundvandspejlinger. Ved stationære modeller kan man derfor ikke knytte samme hyppighed på hændelsen som ved brug af en dynamisk modelberegning.

Hvis der ved en stationær modelberegning benyttes klimainput fra eksempelvis 1997 svarer det ikke blot til et klima som effekten af et enkelt år med 1997 nedbør, men til at gennemsnitsklimaet ændres til 1997 niveau. Det ville svare til at klimaet over en periode på et antal år, svarende til den tid det varer for grundvandssystemet at indstille sig i en ny "ligevægts-situation", blev 15 % mere tørt end det har været i tiåret 1991-2000 eller 8% mere tørt i forhold til 1874-2000. Sandsynligheden (eller hyppigheden) af en sådan hændelse kan aflæses på Fig. 6.18. Såfremt et grundvandsmagasin eksempelvis tager henholdsvis 5 eller 10 år om at tilpasse sig en ny ligevægtssituation kan hyppigheden findes ved i Fig. 6.18 at gå ind på kurven svarende til 5-års henholdsvis 10-års glidende gennemsnit. For eksempel svarer 1997 nedbøren for et 10-års glidende gennemsnit til en fraktil på 5% svarende til en gentagelsesperiode på 20 år. Tilsvarende vil det tørre år (1996) eller de våde år (1994, 1998, 1999) svare til ekstreme hændelser med gentagelsesperioder langt ud over 100 år, såfremt de blev benyttet som input til en stationær grundvandsmodel.

Det skal bemærkes, at en aflæsning ud fra Fig. 6.18 af hvor sandsynlig eller hvor sjælden en given nedbør vil være, forudsætter at det fremtidige nedbørsregime ikke ændrer sig i forhold til den til grund liggende nedbørserie fra 1874-2000. På baggrund af de ændringer der er sket gennem de foregående 130 år (Fig. 6.16) og de forestående varslede klimaændringer kan vi ikke forvente at den forudsætning holder. De konkrete nedbørstal i Fig. 6.18 skal derfor tages med det forbehold, mens transformationen fra hyppigheden af årsværdier til hyppigheden af 5- og 10-års værdier formentlig vil være mere korrekt.

6.9 Referencer

- Allerup, P. and H. Madsen (1979) Accuracy of point precipitation measurements. Danish Meteorological Institute. Climatological papers no. 5.
- Allerup, P., H. Madsen og F. Vejen (1998) Standardværdier (1961-90) af nedbørskorrektio-
ner. Teknisk rapport 98-10, Danmarks Meteorologiske Institut.
- Allerup, P., H. Madsen and J. Riis (1982) Methods for calculating areal precipitation – applied to
the Suså catchment. *Nordic Hydrology*, 13, 263-278.
- Allan, R.G., M. Smith, A. Perrier and L.S. Pereira (1994) An Update for the definition of referen-
ce evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(5), 35-92.
- Allan, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for
computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56, FAO. Rome.
- Aslyng, H.C. (1976) Klima, jord og planter. *Kulturteknik I*, 5. Udgave. DSR Forlag, Kgl. Veteri-
nær- og Landhøjskole.
- Aslyng, H.C. og S. Hansen (1982) Water balance and crop production, Model WATCROS for
local and regional application. *Hydrotechnical Laboratory, The Royal Veterinary and Agri-
cultural University, Copenhagen*.
- Aslyng, H.C. og S. Hansen (1985) Radiation, Water and Nitrogen Balance in Crop Production.
Field Experiments and Simulation Models WATCROS and NITCROS. *Hydrotechnical La-
boratory. The Royal Veterinary and Agricultural University* 146 pp.
- Butts, M., M. Thorsen, E. Bøgh, H. Søgaard, S. Hansen, J.S. Christiansen, P. van der Keur, P.
Abrahamsen, C. Hassager, N.O. Jensen, A. Thomsen, K. Schelde and J.C. Refsgaard
(2001) Modelling evapotranspiration and carbon dioxide fluxes at plot and landscape sca-
le. Manuscript submitted.
- Clark, D.R., J.E. Olesen, H.E. Mikkelsen, S.U. Clausen og J.W. Petersen (1992). Historical
trends in precipitation, evapotranspiration and runoff from nine Danish catchments. *Tids-
skrift for Planteavl's Specialserie*, nr. S2177. 99 pp.
- Colding, A. (1872) Om Lovene for Vandets Bevægelse i Jorden. *Videnskabernes Selskabs
Skrift 5. Række, naturvidenskabelig og matematisk Afd. 9B.VIII* København
- Detlefsen, N.K. og F. Plauborg (2001) Revurdering af metoder til beregning af referencefor-
dampning (potentiel fordampning). *DJF rapport nr. 61. Danmarks Jordbrugsforskning*.
- DVF, Miljøstyrelsen og GEUS (2000) Vandforsyningsstatistik 1999. *Danske Vandværkers For-
ening (DVF)*.
- Feddes, R.A., R.W.R. Koopmans and J.C. van Dam (1999) *Agrohydrology. Department of Wa-
ter Resources, Wageningen University*.
- Forureningsrådet (1971) *Vandressource. Publikation nr. 14*.
- Frich, P., S. Rosenørn, H. Madsen and J.J. Jensen (1997): *Observed Precipitation in Denmark,
1961-90. DMI Technical Report 97-8, Danish Meteorological Institute*.
- Hansen, S. (1984). *Estimation of Potential and Actual Evapotranspiration. Nordic Hydrology* 15,
205-212.
- Henriksen, H.J. (2002) Vandbalancen opgjort på basis af resultater fra DK-model. I: Plauborg,
F., J.C. Refsgaard, H.J. Henriksen, G. Blicher-Mathiasen og C. Kern-Hansen (2002)
Vandbalance på mark- og oplandsskala. Notat udarbejdet af DJF, GEUS, DMU, DMI. *DJF
Rapport 70 Markbrug. Bilag B*.
- Hersch, R.W. (1999): *Hydrometry – Principles and Practices* 2nd ed. Wiley & Sons Ltd.

- Holst, K. A. og K.J. Kristensen (1981) Model for bestemmelse af aktuel fordampning. Rapport SUSÅ H5. Dansk Komite for Hydrologi, Miljøstyrelsen.
- Jensen, S.E. (1996) Agroclimate at Taastrup 1961-1990. Jordbrugsforlaget, København.
- Jensen, H.E. og S.E. Jensen (2001) Jordfysik og Jordbrugsmeteorologi. Det fysiske miljø for plantevækst. DSR Forlag.
- Kemp & Lauritzen (1991) Grundvandsundersøgelse i Tude Å-oplandet. Slagelse Kommunes Vandforsyning.
- Kern-Hansen, Claus (2002): pers. com. Danmarks Meteorologiske Institut.
- Kristensen, K.J. and S.E. Jensen (1975) A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Nordic Hydrology*, 6, 70-88.
- Ladekarl, U. L. (2001) Soil moisture, evapotranspiration and groundwater recharge in forest and heathland. Ph.D. Thesis. Dept. of Earth Sciences. University of Aarhus, Denmark.
- Makkink, G.F. (1957): Ekzameno de la formula de Penman. *Neth. J. Agric. Sci.* 5: 290-305
- Mikkelsen, H.E. og J.E. Olesen (1991) Sammenligning af metoder til potentiel vandfordampning. *Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Beretning nr. S2157.*
- Miljøstyrelsen (1983) Karup Å undersøgelsen. En undersøgelse af landbrugsvandingens hydrologiske følger i oplandet til Karup Å opstrøms Hagebro. Udført af Det danske Hedeselskab og Danmarks Geologiske Undersøgelser for Viborg, Ringkjøbing og Århus amtskommuner og Miljøstyrelsen. Miljøprojekter 51, København.
- Monteith, F.I. (1965) Potential evaporation and river basin evaporation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 91 (HY6), 67-97
- Nielsen M K (2001): Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem, Årsnotat 2001, Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 01-01
- Olesen, J.E. og T. Heidmann (1990) EVACROP. Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen. Vers 1.00. AJMET arbejdsnotat, no. 9. Forskningscenter Foulum, Statens Planteavl's Forsøg. 65 pp.
- Ovesen, N.B., H.L. Iversen, S.E. Larsen, D.-I. Müller-Wohlfeil, L.M. Svendsen, A.S. Blicher og P.M. Jensen (2000) Afstrømningsforhold i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU, nr. 340.
- Penmann, H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Society A*, 190, 120-145
- Penmann, H.L. (1956) Evaporation: An introductory Survey. *Neth. J. Agric. Sci.*, 4,9-29.
- Plauborg, F., J.C. Refsgaard, H.J. Henriksen, G. Blicher-Mathiasen og C. Kern-Hansen (2002) Vandbalance på mark- og oplandsskala. Notat udarbejdet af DJF, GEUS, DMU, DMI. DJF Rapport 70 Markbrug.
- Refsgaard, J.C. (1981) The surface water component of an integrated hydrological model. SUSÅ Rapport H12. Dansk Komite for Hydrologi, Miljøstyrelsen.
- Refsgaard, J.C. (2002) Resume af vandbalancer ved tidligere danske oplandsstudier. I: Plauborg, F., J.C. Refsgaard, H.J. Henriksen, G. Blicher-Mathiasen og C. Kern-Hansen (2002) Vandbalance på mark- og oplandsskala. Notat udarbejdet af DJF, GEUS, DMU, DMI. DJF Rapport 70 Markbrug, Bilag A.
- Refsgaard, J.C., Hansen, S. og Henriksen, H.J. (2001) Problemer med vandbalancer og mulige konsekvenser for beregning af nitratudvaskning, <http://www.vandresource.dk/forskernetvaerk-dk.htm>
- Robinson, A.C. and J.C. Rodda (1969): Rain, wind and the aerodynamic characteristics of Raingauges. *Met. Mag.* Vol. 98
- Scharling, M. (1999a): Klimagrid Danmark - Nedbør 10x10 km (ver. 2) - metodebeskrivelse. DMI Technical Report 99-15

- Scharling, M. (1999b): Klimagrid Danmark - Nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning 20x20 & 40x40 km - metodebeskrivelse. DMI Technical Report 99-12
- Scharling, M. (2000): Klimagrid Danmark. Normaler 1961-90. Måned- og årsværdier. Nedbør 10x10, 20x20 & 40x40 km, Temperatur og potentiel fordampning 20x20 & 40x40 km - metodebeskrivelse & datasæt. DMI Technical Report 00-11.
- Scharling, Mikael & Claus Kern-Hansen (2002): Klimagrid-Danmark. Nedbør og Fordampning 1990-2000, Beregningsresultater til belysning af vandbalancen i Danmark. DMI Danmarks Meteorologiske Institut, Teknik Rapport 02-03.
- Sonnenborg, T.O. (2001) Kalibrering af strømningssmodel. I: *Henriksen et al. (red) Ståbi i grundvandsmodellering*. Kapitel 10, GEUS rapport 2001/56.
- Steffensen M., F. Vejen, A.Hilden, S. Overgaard, M. Scharling and H. Jüngling (2001): Evaluation of the AMIS Gridded Observations and Radar derived 24-hour Accumulated Precipitation by Comparison with Climate Grid – Denmark Gridded Observations. Danish Meteorological Institute Technical Report 01-13.
- Storm, B., M. Styczen og T. Clausen (1990) Regional model for nærings salttransport og –omsætning. NPO-forskning fra Miljøstyrelsen, B15.
- Thomsen, R. (1990) Effect of Climate Variability and Change in Groundwater in Europe. *Nordic Hydrology*, 21, 185-194.
- Thomsen, R. (1998) Klimaændringer og vandressourcer. *Vandteknik*, 232-236.
- Vandbalanceudvalget (1952) Beretning fra Vandbalanceudvalget. Akademiet for de Tekniske Videnskaber. Beretning nr. 17.
- Vandrådet (1989) Ferskvandsressourcens naturlige kvantitet og kvalitet. Rapport fra Arbejdsgruppe 1.
- Vejen F., P. Allerup og H. Madsen (1998): Korrektion for fejlkilder af daglig nedbørmålinger i Danmark. DMI Technical Report 98-9
- Vejen F., P. Allerup og H. Madsen (1999): Korrektion for fejlkilder af daglig nedbørmålinger i Danmark. Resultater 1989-1997. DMI Technical Report 99-07
- Vejen F., H. Madsen og P. Allerup (2000): Korrektion for fejlkilder på måling af nedbør. Korrektionsprocenter ved udvalgte stationer 1989-1999. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 00-20
- Vejen F., H. Madsen og P. Allerup (2001): Korrektion for fejlkilder på måling af nedbør. Korrektionsprocenter ved udvalgte stationer i 2000. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 01-09
- Vejen F. (2002): Korrektion for fejlkilder på måling af nedbør. Korrektionsprocenter ved udvalgte stationer i 2001. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 02-08
- WMO (1998): World Meteorological Organization Solid Precipitation Measurement Intercomparison. WMO/TD No 872 (ed. Goodison, B.E., Louie, P.Y.T. and Yang D)