

Miljøprojekt Nr. 588 2001

Teknologiudviklingsprogrammet for  
jord- og grundvandsforurening

## Roddybder i grønsager

Kristian Thorup-Kristensen  
Danmarks Jordbrugsforskning, Afdeling for Vegetabilske  
Fødevarer

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

# Indhold

<b>1</b>	<b>BAGGRUND</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>HVAD ER RODDYBDE</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>OPTAGELSE OG TRANSPORT AF FORSKELLIGE STOFFER</b>	<b>6</b>
3.1	FORHOLD DER PÅVIRKER RODDYBDEN	6
3.2	RODDYBDE AF FORSKELLIGE ARTER	6
3.3	KORSBLOMSTREDE ARTER	7
3.4	LØGPLANTER	7
3.5	NATSKYGGEFAMILIEN	7
3.6	BÆLGPLANTER	8
3.7	SALTURTFAMILIEN	8
3.8	SKÆRMPLANTER	8
3.9	KURVEBLOMSTER	8
3.10	GRÆSSER	9
3.11	GRÆSKARFAMILIEN	9
3.12	ANDRE	9
3.13	FRUGT OG BÆR	9
<b>4</b>	<b>KONKLUSIONER</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCE LIST</b>	<b>11</b>

# 1 Baggrund

Denne redegørelse er udført for at få et førstehåndsbud på, hvilke dybder grøntsager potentielt vil kunne optage forureningskomponenter fra. Som udgangspunkt må det slås fast at der er tale om en grov generalisering. Begrebet "forurenede jord" dækker over jord forurenede med stoffer med helt forskellige egenskaber for deres opførsel i jorden, for deres opførsel i planterne og for deres farlighed for mennesker. Samtidig forekommer stofferne formodentligt i voldsomt varierende koncentrationer.

Der er i notatet redegjort for, hvorledes "roddebyde" mest relevant kan defineres i denne sammenhæng og hvor stor roddebyden er for forskellige afgrøder.

## 2 Hvad er roddebybde

Begrebet roddebybde er ikke veldefineret. I de dybeste jordlag hvor en plante har rødder, vil der normalt findes så få rødder at de ikke har nogen praktisk betydning. For praktisk anvendelse har man derfor behov for at definere en "effektiv roddebybde" der viser til hvilken dybde rodsystemet reelt er effektivt. Effektiv roddebybde har været forsøgt defineret ud fra en bestemt rodtæthed eller ud fra den relative fordeling af rødderne i jorden. F.eks. arbejdede Greenwood et al. (1982) med en definition hvor roddebybden blev beregnet som den dybde hvor 90% af rodlængden fandtes over og kun 10% under.

Der er dog alvorlige problemer med begge disse definitioner, og man skal være opmærksom på, at den relevante rodtæthed afhænger stærkt af hvilket stof der er tale om. For meget mobile stoffer som f.eks. nitrat er der kun behov for en ganske lav rodtæthed for at planten kan optage alt hvad der er til stede; for immobile stoffer som fosfor skal der en meget højere rodtæthed til, før planten effektivt kan udnytte et givet jordlag. Gregory (1988) anslår f.eks. at nitrat-ioner kan bevæge sig med en hastighed på ca. 4 mm per døgn hen imod en rod, mens kalium-ioner kan bevæge sig med ca. 1,3 mm per døgn og fosfat-ioner med kun 0,04 mm per døgn. Der vil altså være jordlag hvor planterne selv med en lav rodtæthed alligevel effektivt kan udnytte nitrat, men kun i meget beskedent omfang kan udnytte fosfor, og den effektive roddebybde for udnyttelse af de to stoffer er dermed helt forskellig.

Hvilken rodtæthed og roddebybde er så relevant i forbindelse med forurenede jord, den lave rodtæthed der er relevant for nitrat eller den meget højere rodtæthed der er relevant for f.eks. fosfor? Her er der to forhold der trækker klart i hver sin retning.

Stoffer, der er lige så mobile i jorden som nitrat, udvaskes også let med overskudsnedbør, og vil normalt ikke udgøre langsigtede problemer i de øvre jordlag. Dermed må man forvente at de stoffer der udgør et problem i forurenede jord, i praksis vil være stoffer med en lavere mobilitet. Dette forhold peger på at, den effektive roddebybde for optagelse af "forureningsstoffer" vil være klart mindre end for nitrat.

På den anden side er den effektive roddebybde for nitrat defineret ud fra planternes evne til at udtømme et givet jordlag effektivt, og jordlag hvor de kun får fat i f.eks. 10% vil regnes som værende under den effektive roddebybde. For optagelse af forureningsstoffer kan optagelser på langt under 1% derimod være for meget. Dette forhold peger på, at den effektive roddebybde for optagelse af "forureningsstoffer" kan være klart dybere end for nitrat.

På den baggrund må det være relevant at regne med de roddebybder der er fundet for udnyttelse af relativt mobile stoffer i jorden som nitrat eller vand. Med kendskab til de enkelte forureningsstoffer og deres opførsel i jorden og i planterne, vil der naturligvis kunne gives en mere nuanceret rådgivning.

# 3 Optagelse og transport af forskellige stoffer

Planterne er naturligt tilpassede til at optage de næringsstoffer fra jorden, der er nødvendige for deres vækst. Optagelsen af andre stoffer varierer meget stærkt, nogle optages i betydeligt omfang, f.eks. fordi de optages af de samme mekanismer som optager næringsstoffer i planterne. Dette udnyttes i studier, hvor stoffer som bromid (Blumenthal et al. 1999), strontium (Oliver, Barber, 1966) eller rubidium (Kuhlmann et al. 1985) bruges som tracere for optagelse af forskellige plantenæringsstoffer.

Der findes ikke mange studier af optagelsen af organiske forbindelser i planternes rodsystemer, men f.eks. blandt pesticiderne kender man stoffer der efter sprøjtning på planterne optages og fordeles effektivt i planterne (f.eks. glyphosat og systemiske fungicider) mens andre forbliver på overfladen og kun i meget begrænset omfang optages og transporteres til andre dele af planterne. Tilsvarende må forventes at gælde for organiske forbindelser i jorden (Jensen et al., 1997). Nogle stoffer vil forblive der, hvor de kommer i kontakt med planterne, og vil dermed kun være et problem, hvis de kommer i direkte kontakt med de spiselige dele af planterne. Andre må forventes at optages og fordeles mere effektivt i planterne, og nogle kan opkoncentreres i planterne (bioakkumulering, se Jensen et al., 1997).

Endelig skal man være opmærksom på at optagelse og transport af forskellige stoffer kan variere meget stærk imellem plantearter.

## 3.1 Forhold der påvirker roddybden

Forskellige plantearter har meget forskellige egenskaber med hensyn til rodvækst, og der er en stor variation imellem arterne i den roddybde der i praksis opnås. Men der er også en række andre forhold der påvirker roddybden, f.eks. kan jordtype, pakningsgrad af jorden (f.eks. Barraclough et al. (1991)), grundvandsstand, iltforhold, surhedsgrad og andre kemiske forhold i dybere jordlag kan være af stor betydning (Gregory, 1988; Marschner, 1986). I praksis betyder det, at den samme plantearter kan opnå vidt forskellige roddybder på forskellige jorder, og f.eks. fandt (Hamblin, Tennant, 1987) i australske forsøg at roddybden af hvede, byg og lupin varierede fra ca. 100 cm til næsten 300 cm afhængigt af hvilken jord de blev dyrket på.

Bortset fra de nævnte mere grundlæggende jordbundsforhold, er der også forhold af mere kortvarig natur som påvirker roddybden af den enkelte afgrøde. Rødder vokser og forgrener sig mere i jordlag hvor der er næringsstoffer til stede (se Marschner 1986), og det betyder i praksis at tilstedeværelse af f.eks. nitrat i dybere jordlag kan fremme roddybden i hvert fald hos nogle plantearter (Thorup-Kristensen, 1993, 1999).

Også vandforsyning kan have en effekt, og det er f.eks. vist at majs, der udsættes for udtørring, primært fortsætter sin rodvækst og rodforgrening i dybere jordlag hvor der stadig er vand (Engels et al. 1994). Hvis der igen tilføres vand til de øverste jordlag, reduceres rodforgreningerne i de dybe jordlag, mens der sker nye forgreninger i de øverste. Barraclough et al. (1991) fandt noget tilsvarende for hvede, men den samlede effekt på roddybden var begrænset til kun ca. 20 cm.

## 3.2 Roddybde af forskellige arter

I de fleste rodundersøgelser forsøges det slet ikke at måle roddybden af planterne; på grund af de krævende arbejdsmetoder nøjes man med at undersøge de jordlag man antager er

relevante. Canadell et al. (1996) har undersøgt publicerede resultater hvor roddybden faktisk er målt. For landbrugsafgrøder konkluderer de at den gennemsnitlige roddybde er ca. 210 cm, væsentligt dybere end det normalt antages. Der findes en række eksempler på dette for afgrøder der er almindelige under danske forhold, og som er tæt beslægtede med nogle af vores grønsagsafgrøder. Peterson et al. (1979) fandt at sukkerroer effektivt kunne optage nitrat fra 210 cm dybde og til dels fra 240 cm dybde. (Barraclough, 1989) målte rodvækst hos vinterraps, og fandt en betydelig rodtæthed helt ned til 180 cm som var den største dybde de undersøgte. Også fra Danmark er der fundet eksempler på hurtig og dyb rodvækst (Thorup-Kristensen, 2000a, 2000b). Resultaterne viser at f.eks. grønsagsafgrøder som hvidkål, eller efterafgrøder af olieræddike og cikorie kan tømme jorden fuldstændigt for dens indhold af nitrat ned til 150 cm (Thorup-Kristensen, 1999, 2000a) som var den maksimale måledybde. Den effektive roddybde af disse afgrøder var altså mere end 150 cm.

Forskelle i roddybde imellem afgrøder ser ud til at afhænge af to hovedfaktorer, 1) rodvækstrate og 2) længden af vækstperioden. Roddybden ser ud til at øges med en stort set konstant rate igennem vækstperioden (Thorup-Kristensen, 1998, 2000; Thorup-Kristensen and Van den Boogaard, 1998, 1999; Greenwood *et al.*, 1982). Den konkrete rate ser ud til at være relativt ens for større grupper af plantearter (Greenwood *et al.*, 1982; Thorup-Kristensen 2000a, 2000b). De angivne roddybder i det følgende er effektive roddybder for udnyttelse af stoffer som vand og nitrat.

### 3.3 Korsblomstrede arter

**Grønsager:** Hvidkål, rødkål, grønkål, spidskål, blomkål, broccoli, rosenkål, kinakål, knudekål, radis, ræddike

**Landbrugsafgrøder:** raps, kålroer, sennep

Denne gruppe ser ud til at have meget hurtig udvikling af stor roddybde (Barraclough, 1989; Smit et al. 1996; Thorup-Kristensen 2000a, 2000b, Thorup-Kristensen and Van den Boogaard, 1998). Grønsagsarterne i denne gruppe varierer fra radiser med meget kort vækstsæson, til hvidkål der ofte kan have en vækstsæson på 6 måneder eller mere, og roddybderne varierer sandsynligvis tilsvarende. Adskillige resultater viser, at de arter der har den længste vækstsæson kan opnå meget store roddybder (Barraclough, 1989; Thorup-Kristensen and Sørensen, 1999, Thorup-Kristensen 1999). Afgrøder med en kortere vækstsæson, f.eks. broccoli, blomkål, spidskål eller tidlig hovedkål opnår typisk roddybder fra ca. 75 cm til mere end 100 cm (Burns, 1980; Greenwood et al. 1982, Thorup-Kristensen, 1993, 2000, Thorup-Kristensen and Van den Boogaard, 1998). Arter med kort vækstsæson, f.eks. radiser og knudekål opnår kun en begrænset roddybde på 50 cm eller mindre (Kuhlmann, 1990; Schenk et al. 1991).

### 3.4 Løgplanter

**Grønsager:** Løg, skalotteløg, porre

Arterne i denne gruppe har den laveste rodvækstrate blandt grønsagsarterne, med rater der ligger på kun 15% til 20% af rodvækstraten for korsblomstrede arter (Thorup-Kristensen, 2000b). Selv for porrer, der har en meget lang vækstsæson, betyder det at roddybden bliver begrænset til næppe meget mere end 50 cm (Burns, 1980; Smit et al. 1996; Thorup-Kristensen and Sørensen, 1999), og for løg bliver den normalt fundet til kun ca. 25 cm (Burns, 1980; Greenwood *et al.*, 1982; Thorup-Kristensen, 2000b).

### 3.5 Natskyggefamilien

**Grønsager:** Kartoffel, tomat, peber, aubergine

**Landbrugsafgrøder:** Kartoffel

Der findes kun få referencer på rodvækst af arter i denne plantefamilie. Nogle få referencer på kartoffel antyder roddybder på op imod 100 cm (Parker et al. 1991; Haverkort et al. 1994; Kutchera and Licthenegger, 1982b). Tomater antages generelt at kunne opnå meget stor roddybde, men de to referencer jeg har fundet for dyrkning af tomater på friland tyder

ikke på roddybder væsentligt over 100 cm (Qasem, 1993; Hösslin, 1954). Men ved dyrkning i væksthuse, hvor der opnås en lang vækstsæson med væsentligt højere temperaturer end på friland, er det rimeligt at antage at tomat kan opnå væsentligt større roddybde end kartoffel.

Jeg har endnu ikke fundet nogen referencer på dybden af kartofflens knolde, men de vil i praksis altid findes inden for de øverste 15-20 cm af jorden.

### 3.6 Bælgplanter

**Grønsager:** Ærter, bønner, fababønner, pralbønner

**Landbrugsafgrøder:** Ærter, hestebønner, lupiner, lucerne, hvidkløver, rødkløver

Der findes i denne plantefamilie arter der kan opnå meget stor roddybde (Kutchera and Lichtenegger, 1982b), blandt almindelige landbrugsplanter antages lucerne således normalt at være den art der har dybest rodvækst. Rodvækstraterne ser dog ud til at være moderate (Thorup-Kristensen, 1998, 2000a), og den dybe rodvækst må forventes især at findes hos arter med lang vækstsæson og flerårige arter som lucerne. Grønsagsarterne har alle en relativt kort vækstsæson, og det må forventes, at de under danske forhold typisk vil opnå en effektiv roddybde på imellem 50 og 100 cm sådan som det er fundet for ærter (Hamblin, Tennant, 1987; Greenwood *et al.*, 1982, Thorup-Kristensen, 1998). Enkelte eksempler på større roddybder for ært er dog fundet, f.eks. Hösslin (1954) og Armstrong *et al.* (1994).

### 3.7 Salturtfamilien

**Grønsager:** Rødbeder, spinat, bladbeder

**Landbrugsafgrøder:** Sukkerroer

Der findes ikke så mange målinger af roddybder i denne plantefamilie, men enkelte målinger viser at roer kan have en betydelig rodaktivitet til langt over 100 cm dybde, og som tidligere nævnt helt ned til 240 cm (Strebel, Duynisveld, 1989; Peterson *et al.* 1979). På den baggrund er det rimeligt at antage at også rødbeder kan opnå roddybder på væsentligt over 100 cm.

Spinat ser ud til at have en overfladisk rodvækst, roddybder fra 30 til 60 cm, i overensstemmelse med afgrødens meget korte vækstsæson (Kuhlmann *et al.* 1985; Schenk *et al.* 1991).

### 3.8 Skærmplanter

**Grønsager:** Gulerod, selleri, pastinak, persillerod, persille

Der findes ikke så mange målinger af roddybde hos planter fra denne familie, men det ser ud til at de har moderate rodvækstrater af samme størrelsesorden som ærter, men kun godt halvt så hurtigt som korsblomstrede arter (Thorup-Kristensen, 2000b; Thorup-Kristensen and Van den Boogaard, 1998, 1999). Da mange af arterne har en lang dyrkningssæson opnås der alligevel en betydelig roddybde (Burns, 1980; Greenwood *et al.*, 1982; Thorup-Kristensen 2000a; Thorup-Kristensen and Van den Boogaard, 1999). Roddybder på 100 cm eller mere ser ud til at være realistisk i mange situationer.

### 3.9 Kurveblomster

**Grønsager:** Salat, cikoriesalat, julesalat, jordskok, artiskok, skorzonnerod

**Landbrugsafgrøder:** Solsikke, cikorie

Kutchera and Lichtenegger (1982b) har målt rodvækst på en række arter i denne plantefamilie og fundet at en del af dem har meget dyb rodvækst, ned til mellem 2 og 3 meter. Foreløbige resultater med cikorie tyder på at den hurtigt kan opnå en effektiv roddybde på 150 cm (Thorup-Kristensen, upubliceret). Sammenligning af rodvækstrater tyder på at salat kan have lige så hurtigt rodvækst som kål (Thorup-Kristensen, 2000b).

Den vigtigste grønsagsafgrøde i denne gruppe er salat, og den har kun en kort vækstsæson, og opnår dermed kun en begrænset roddybde, typisk 30 til 60 cm (Burns, 1989; Jackson, Stivers, 1993; Thorup-Kristensen, 2000b). De fleste af de nævnte grønsager fra denne plantefamilie har en lang vækstsæson, og må forventes at kunne opnå meget betydelige roddybder, måske samme dybder som kålafgrøder med lang vækstsæson, men der mangler konkrete data. Til gengæld er det ikke afgrøder der normalt spises i større mængder i Danmark. Hos jordkok og skorzonerrød høstes den spiselige del direkte fra jorden, og specielt for skorzonerrød tilstræbes det at opnå en lang slank pælerod der når dybt ned, mere end 30 cm vil de dog sjældent nå.

### 3.10 Græsser

**Grønsager:** Majs

**Landbrugsafgrøder:** Majs, alle kornarterne og græsserne

Denne plantefamilie findes normalt at have moderate rodvækstrater (Thorup-Kristensen, 2000a), og de er oftest ikke istand til at opnå større rodtæthed i dybe jordlag (Kutchera and Lichtenegger, 1982a). Under tempererede forhold er roddybden af majs målt til mellem 100 og 150 cm (Wiesler, Horst, 1994). De typer der dyrkes som grønsagsafgrøde høstes noget tidligere, og effektive roddybder på mere end 100 cm er nok ikke normalt i praksis.

### 3.11 Græskarfamilien

**Grønsager:** Agurk, squash, melon, græskar

Der findes meget lidt litteratur om roddybder af disse arter. Den umiddelbare konklusion ser ud til at være, at de (i hvert fald under danske betingelser) ikke vil nå ret dybt, men den konklusion bygger på et meget tyndt grundlag.

### 3.12 Andre

**Grønsager:** Asparges, rabarbar

Jeg har endnu ikke fundet noget på disse arter, og det er ikke sikkert at der findes noget brugbart. Begge arter er flerårige, og i hvert fald for rabarbar gælder det, at den er nært beslægtet med arter med et meget dybt rodsystem (Kutchera and Lichtenegger, 1982b). Der er dermed sansynlighed for at også disse to arter har dybt rodsystem.

### 3.13 Frugt og bær

Også på dette område er der meget lidt litteratur der dokumenterer roddybder. Gregorey (1988) viser et eksempel på en opgravet solbærbusk der har haft rødder til mindst 200 cm dybde. Den generelle konklusion ser ud til at være, at arter med så lang vækstsæson i princippet kan opnå meget store roddybder og at den aktuelle roddybde er nok i praksis ofte bestemt af forhold som vinterens grundvandsstand, og kemiske eller fysiske barrierer i jorden.

## 4 Konklusioner

- 1) Der er stor forskel i roddebder imellem grønsagsarter. Nogle arter kan opnå stor roddebde, det vil sige 200 cm eller mere, men de fleste af afgrøderne når ikke nær så dybt. Der er dog mange arter der kan forventes at nå effektive roddebder på ca. 100 cm.
- 2) Etablering af et dybt rodsystem tager tid, og afgrøder med meget kort vækstsæson udvikler derfor ikke et dybt rodsystem.
- 3) Korsblomstrede arter kan opnå stor roddebde, og dyrkes der arter med lang vækstsæson som f.eks. sent høstede kål, må man regne med at effektive roddebder på 200 cm kan nås i en række tilfælde. Enkelte andre arter kan evt. have lige så dyb rodvækst.
- 4) Flerårige afgrøder kan nå meget betydelige roddebder, og hos mange af disse arter vil den maksimale roddebde ofte være bestemt af jordens kemiske og fysiske forhold (f.eks. højden af grundvandsspejlet, overgang til anaerobe forhold i større dybde eller lignende).
- 5) Rodafgrøder har normalt de spiselige dele placeret inden for de øverste ca. 20 cm, men nogle arter kan have spiselige dele i større dybde.

En del af de stoffer, som er relevante i jordforureningssammenhæng, må forventes at blive optaget og transporteret rundt i planterne. En nærmere afklaring af hvilke stoffer og hvilke forureningsniveauer der kan medføre en væsentlig optagelse i planterne, kombineret med ovenstående vurderinger af den effektive roddebde, kunne danne grundlag for fastlæggelse af udskiftningsdybden for forurennet jord.

Andre stoffer, som er relevante i jordforureningssammenhæng optages og transporteres næsten ikke i planterne (Jensen et al., 1997), og det er derfor næppe noget problem at rødderne kommer i kontakt med sådanne stoffer. Hvis jordforureningen udgøres af stoffer hvor det er klart dokumenteret, at de praktisk taget ikke optages og transporteres i planterne, kan udskiftningsdybden dimensioneres efter at kontakt imellem forurennet jord og de spiselige plantedele undgås.

## 5 Reference List

- Armstrong EL, Pate JS, Tennant D, 1994. The field pea crop in south western australia - patterns of water use and root growth in genotypes of contrasting morphology and growth habit. *Australian Journal of Plant Physiology* 21:517-532
- Barracough PB, 1989. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant and Soil* 119:59-70
- Barracough PB, Wier AH, Kuhlmann H, 1991. Factors affecting in growth and distribution af winter wheat roots under UK field conditions. Elsevier Science Publishers B.V.Plant roots and their enviornment 410:417
- Blumenthal JM, Russelle MP, Lamb JFS, 1999. Subsoil nitrate and bromide uptake by contrasting alfalfa entries. *Agronomy journal* 91:269-275
- Burns IG, 1980. Influence of the spatial distribution of nitrate on the uptake of N by plants: A review and a model for rooting depth. *J.Soil Sci.* 31:155-173
- Burns IG, 1989. Response of lettuce to a change in nitrate distribution in the root zone. Proceedings of a meeting on plant and soil nitrogen metabolism, Lancaster,September 1989, paper 37 2:1-8
- Canadell J, Jackson RB, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze E-D, 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108:583-595
- Engels C, Mollenkopf M, Marschner H, 1994. Effect of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths. *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 157:139-144
- Greenwood DJ, Gerwitz A, Stone DA, Barnes A, 1982. Root development of vegetable crops. *Plant and Soil* 68:75-96
- Gregory, P.J. (1988) Growth and functioning of plant roots. In: Wild. A. (ed.) Russell's soil conditions & plant growth, page 113-167.
- Hösslin R, 1954. Ein Beitrag zur Kenntnis der Wurzelwachstums einiger Gemüsearten unter natürlichen Verhältnissen. *Gartenbau* 1954:47-62
- Hamblin A, Tennant D, 1987. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated? *Aust.J.Agric.Res.* 38:513-527
- Haverkort AJ, Groenwold J, Van de Waart M, 1994. The influence of cyst nematodes and drought on potato growth. 5. Effects on root distribution and nitrogen depletion in the soil profile. *European Journal of Plant Pathology* 100:381-394
- Jackson LE, Stivers LJ, 1993. Root Distribution of Lettuce Under Commercial Production: Implications for Crop Uptake of Nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture* 9:273-293
- Jensen, J. Kristensen, H.L. and Scott-Fordsmann, J.J. (1997) Soil quality criteria for selected compounds. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Working Report No. 83, 1997

- Kuhlmann H, 1990. Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. *Plant and Soil* 127:129-136
- Kuhlmann H, Classen N, Wehrmann J, 1985. A method for determining the K-uptake from subsoil by plants. *Plant and Soil* 83:449-452
- Kutschera L and Lichtenegger E 1982a Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band I. Monocotyledoneae. pp 517. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- Kutschera L and Lichtenegger E 1982b Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band II. Dicotyledoneae. pp ??? Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- Marschner, H. (1986) Effects of external and internal factors on root growth and development. In: Marschner, H (1986) Mineral nutrition of higher plants, page 429-446.
- Oliver S, Barber SA, 1966. Mechanisms for the Movement of Mn, Fe, B, Cu, Zn, Al and Sr from One Soil to the Surface of Soybean Roots (*Glycine max*). *Proceedings / Soil Science Society of America* 30:468-470
- Parker CJ, Carr MKV, Jarvis NJ, Poplamu BO, Lee VH, 1991. An evaluation of the minirhizotron technique for estimating root distribution in potatoes. *J.Agric.Sci.Camb.* 116:341-350
- Peterson GA, Anderson FN, Varvel GE, Olson RA, 1979. Uptake of <sup>15</sup>N-labeled nitrate by sugar beets from depths greater than 180 cm. *Agronomy journal* 71:371-372
- Qasem JR, 1993. Root Growth, Development and Nutrient Uptake of Tomato (*Lycopersicon esculentum*) and *Chenopodium album*. *Weed Research* 33:35-42
- Schenk M, Heins B, Steingrobe B, 1991. The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization. *Plant and Soil* 135:197-203
- Smit AL, Booij R, Van der Werf A, 1996. The spatial and temporal rooting pattern of Brussels sprouts and leeks. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 44:57-72
- Strebel O, Duynisveld WHM, 1989. Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on a silty loam soil. *Z.Pflanzenernär.Bodenk.* 152:135-141
- Thorup-Kristensen, K. 1993. Root growth of nitrogen catch crops and of a succeeding crop of broccoli, *Acta Agric Scand, Sect B, Soil and Plant Sci* , 43: 58-64
- Thorup-Kristensen, K and Van den Boogaard, R. 1998 Temporal and spatial root development of cauliflower (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*), *Plant and Soil* 201: 37-47
- Thorup-Kristensen, K. 1998. Root development of green pea (*Pisum sativum L.*) genotypes, *Crop Science* 38: 1445-1451.
- Thorup-Kristensen, K and Sørensen, J.N. 1999 Soil nitrogen depletion by vegetable crops with variable root growth, *Acta Agric. Scand. Sect. B. Soil Plant Sci.*, 49: 92-97
- Thorup-Kristensen, K and Van den Boogaard, R. 1999 Vertical and horizontal development of the root system of carrots following green manure. *Plant and Soil* 212: 145-153
- Thorup-Kristensen, K. 1999. An organic vegetable crop rotation self-sufficient in nitrogen. In: Olesen, J.E., Eltun, R., Gooding, M.J., Jensen, E.S. & Köpke, U. (Eds) *Designing and testing crop rotations for organic farming. DARCOF Report no. 1.* p 133-140

- Thorup-Kristensen, K. (2000a) Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their effect on nitrogen leaching losses? Submitted to *Plant and Soil*.
- Thorup-Kristensen, K. (2000b) Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot. Submitted to *Acta Horticulturae*.
- Wiesler F, Horst WJ, 1994. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant and Soil* 163:267-277