

Manningtallet for vandløb

– en uudtømmelig kilde til diskussion

I 2000 lovede Europas lande hinanden via Vandrammedirektivets snørklede paragrafer at vandområder og dermed vandløb i fremtiden skulle have en god økologisk kvalitet. Når dette løfte bringer noget så nørdet som hydraulikfagets Manningtal i fokus, er årsagen, at god økologisk vandløbskvalitet kun opnås, hvis Manningtallet er lavt svarende til at oprensning og grødeskæring mv. holdes på et minimum. Imidlertid kræver lav risiko for oversvømmelse en høj grad af vedligeholdelse og et højt Manningtal. Modsætningen mellem godt miljø og god vedligeholdelse er uomgængelig. Løsningen af de sammensatte problemer i vandløbene kræver et godt kendskab til de økologiske indikatorer, men også en god forståelse af Manningtallet.

TORBEN LARSEN

Manningformlens formulering

Manningtallet M er en eksperimentelt bestemt koefficient, som indgår i Manningformlen, der beregner vandføringen Q i et vandløb, hvor der strømmer i en stationær (konstant i tid), ensformig (konstant i sted, dvs. i strømretningen) og turbulent strømning. Manningformlen lyder:

$$Q = A M R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

hvor A er strømningstværsnittets areal, R er *hydraulisk radius* defineret som $R = A/P$, og P er den "våde omkreds", dvs. længden af den "våde" del af tværsnittets omkreds og S er faldet på vandspejlet (hældningen i rent tal). Kun SI-enheder må benyttes.

Et par ord om Manningformlens historie

Den irske vandingeniør Robert Manning (1823 - 1897) fremlagde i 1890 efter et helt livs studier, der omfattede flere hundrede vandløb, sin sidste og endelige version af det som vi i dag kalder Manningformlen. I samme periode var adskillige andre forskere og in-

geniører kommet frem til stort set samme, men det blev Manning, der løb af med æren og fik sit navn knyttet til formelen. I Danmark har flere forskellige formler været anvendt de sidste 200 år. Dog skal nævnes, at den geniale multividenskabsmand, civilingeniør, professor og stadsingeniør L.A. Colding (1815 - 1888) udviklede en lignende (og lige så nøjagtig) formel, som i en årrække blev benyttet. Colding's formel har nu været glemt i adskillige generationer.

Manningformlen sammenknytter vandføring og vandstand til en Q/h-kurve

Med kendskab til vandløbstværsnittets geometri vil A og R være kendte funktioner af vandstandskoten h , og derfor kan der ud fra Manningformlen beregnes en Q/h -kurve (vandføring-vandstandskote-kurve) på lokaliteten. Af formelen ses, at en bestemmelse af Manningtallet kræver måling af de øvrige størrelser i ligningen, dvs. af Q , A , P og S .

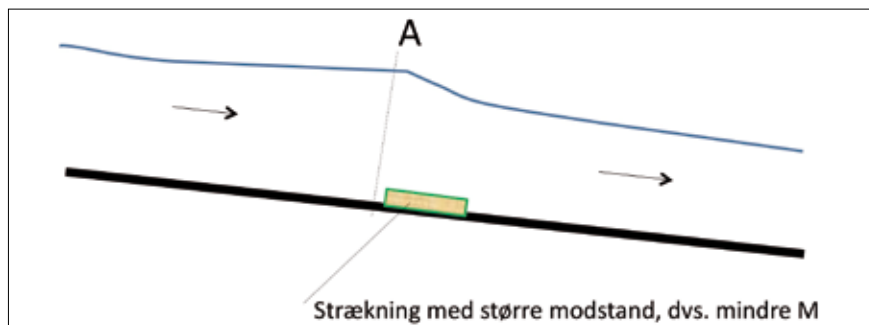
Det geniale ved Manningformlen er, at erfaringen viser, at Manningtallet kun afhænger af ruheden af det bundmateriale som vandløbet består af. Tværsnittets form og størrelse har ikke indflydelse. Den almindelige antagelse er derfor at M i et vandløb ikke afhænger af vand-



Robert Manning (1823 - 1897)

dybden eller af vandføringen.

Manningtallet kan slås op i en hånd- eller lærebog og nøjagtigheden ligger på 10 - 20 %. Men særligt de grødefyldte vandløb adskiller sig herfra med en langt større usikkerhed, der betyder, at Manningformlen tilsyneladende ikke er specielt egnet til beskrivelse af vandføringsevnen (dvs. Q/h -kurven) i grødefyldte



Figur 1. Opstuvning i vandløb på grund af kort strækning med tæt grøde (grøn). I snit A-A er der grødefrit, men vandstanden og Manningtallet svarer til grødefyldt vandløb.

vandløb og dermed til at forudsige vandstanden ved blandt andet oversvømmelsessituationer i sommerperioden. Denne usikkerhed er ikke en fejl ved formlen, men er et udtryk for, at den hydrauliske ruhed i de virkelige vandløb varierer stærkt med grødens omfang og sammensætning.

Hydraulisk radius eller modstandsradius

I fagkredse hersker der tvivl om det i forbindelse med brug af vandløbsmodeller (edb-modeller) er mest korrekt at benytte hydraulisk radius $R = A/P$ eller modstandsradius R^* , som med udgangspunkt i Colebrook og White's formel for hydraulisk ruhed er udledt til følgende (Engelund og Pedersen, 1978):

$$R_* = \left(\frac{1}{A} \int_0^B y^{2/3} dx \right)^2 \quad (2)$$

hvor B er vandløbets bredde, y er den lokale vanddybde og x er den tværgående afstand vinkelret på strømretningen og B er vandløbets bredde. En anden og lettere forklarlig formel end (2) baseret på Manningformlen eksisterer (Brorsen og Larsen, 2009), men skal ikke omtales nærmere her da forskellen i praksis er ubetydelig.

Anvendelse af hydraulisk radius forudsætter at forskydningsspændingen mellem vand og bund/sider langs den våde omkreds kan regnes at være konstant. Men bruges modstandsradius, antages forskydningsspændingen at være proportional med den lokale vanddybde.

Der er ingen absolut sandhed. I virkeligheden ligger fordelingen af forskydningsspændingen et sted mellem disse to yderligheder, og det handler om at vælge den af disse to antagelser, der er mest nøjagtig i det konkrete tilfælde. For danske vandløb vil hydraulisk radius oftest være mest nøjagtig, og det er en misforståelse at tro, at modstandsradius er generelt gældende og at hydraulisk radius blot er et specialtilfælde heraf.

Sommetider argumenteres der for, at modstandsradius er mest egnet, fordi Q/h -kurver beregnet med hydraulisk radius i nogle spe-

cielle tværsnit (for eksempel ved dobbeltprofiler) får et lidt urealistisk forløb, hvad modstandsradius ikke gør. Dette er dog en misforståelse. Forløbet af en teoretisk beregnet Q/h -kurve fortæller ikke noget om forskydningsspændingernes virkelige fordeling. Problemet er derimod af numerisk/matematisk natur i edb-modellerne, som har problemer med at håndtere at hydraulisk radius $R = R(h)$ matematisk set ikke er en kontinuert funktion af h ved dobbeltprofiler for den værdi af h hvor bunden er vandret.

Modstandsradius bør benyttes ved meget brede floder og vandløb og hydraulisk radius skal bruges ved rør, kanaler og vandløb, hvor bredden ikke er meget større end vanddybden. Begge begreber er praktiske tillempninger til et kompliceret 3-dimensionalt strømningssystem med tværgående cirkulationsstrømninger, hvor også de langsgående retnings- og tværsnitsvariationer (meandering) spiller ind. Derfor kan der ikke gives præcise retningslinjer, for hvornår det ene eller det andet er det mest rigtige (dvs. giver den mindste fejl i forhold til virkeligheden).

Det er Manningformlen som definerer Manningtallet, og Manningtallet bliver derfor forskelligt afhængt af om der tages udgangspunkt i hydraulisk radius eller modstandsradius. Ved en formel udregning på typiske vandløbstværsnit vil modstandsradius være 20 - 30 % større end med hydraulisk radius. Hvis man herefter regner baglæns til Manningtallet ved indsætning i Manningformlen fås tilsvarende to forskellige Manningtal, hvor "modstandsradius-Manningtallet" må være ca. 10 - 20 % mindre en "hydraulisk-radius-Manningtallet" for at give den samme vandføring som den der var målt.

Trods at det egentlig er ubegrundet, har der som sagt udviklet sig den praksis at benytte modstandsradius ved edb-modellering. Når det går godt så skyldes det, at det kun har ubetydelige konsekvenser for nøjagtigheden såfremt der benyttes et korrigeret Manningtal, der netop tager hensyn til ovennævnte forskel. Det ses ved, at de Q/h -kurver, der herefter

ter beregnes med de to metoder kun afviger minimalt fra hinanden.

Af hensyn til den hydrauliske forståelse (og for ikke at forvirre ikke-fageksperter) burde der eksistere to forskellige betegnelser og symboler for de to Manningtal, et hydraulisk-radius-Manningtal M og modstandsradius-Manningtal M^* .

I den virkelige verdens vandløb er forskellen mellem M og M^* for samme vandløb som sagt omkring 10 - 20 %. Blandes de to typer Manningtal sammen risikerer man derfor at indføre en ensidig fejl i beregninger.

Ved de oprindelige afvandingsprojekter, der i sin tid blev basis for regulativerne, var det selvsagt hydraulisk radius som blev benyttet. Hvis der i et vandløbsregulativ er nævnt et Manningtal må det ligeledes formodes at det er knyttet til hydraulisk radius.

Manningtallet i internationalt perspektiv

I den internationale litteratur forekommer anvendelsen af modstandsradius stort set ikke, men effekten medtages ofte ved en korrektion af Manningtallet ved særligt ved brede og sammensatte tværsnit. I en oversigtsartikel (B.C. Yen, 2002), beskrives 16 forskellige (men seriøse) metoder for dette.

Her skal kun omtales den nok mest udbredte internationale tilgang til forudsige Manningtallet i naturlige vandløb, metoden anbefalet af det amerikanske US Geological Survey (2001). Metoden bygger på at Manning's n (dvs. $n = 1/M$) kan splittes op i et antal delelementer bestående af en basisværdi n_b plus et antal korrektioner:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (3)$$

n_b basisværdi for lige, glat og ensformig kanal i naturlig jord ($n_b = 0,012 - 0,026$)

n_1 korrektion for uregelmæssigheder på bund ($n_1 = 0 - 0,020$)

n_2 korrektion for tværsnitsvariationer ($n_2 = 0 - 0,015$)

n_3 korrektion for forhindringer (obstruktioner) ($n_3 = 0 - 0,05$)

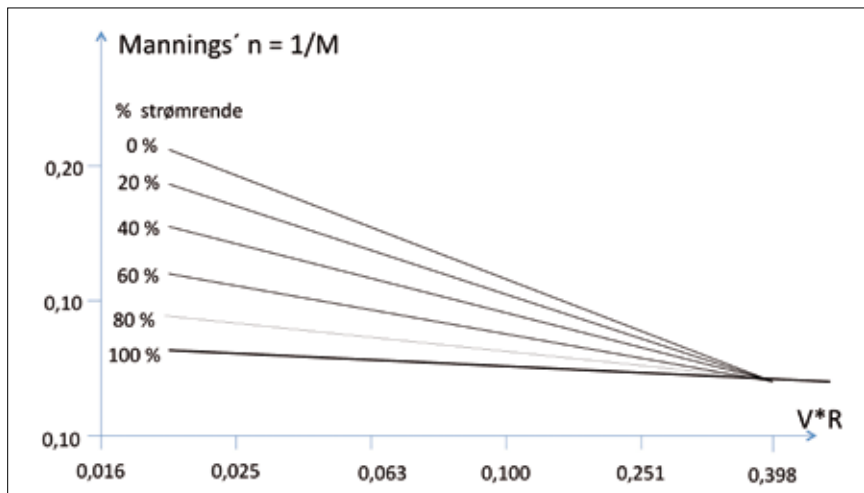
n_4 korrektion for vegetation ($n_4 = 0 - 0,1$)

m korrektionsfaktor for meandering ($m = 1,0 - 1,3$)

Ud fra de angivne intervaller for korrektionerne fås et indtryk af størrelsen og årsagen til variationen af Manningtallet.

Hydraulisk korrekte målinger til bestemmelse af Manningtallet

Formålet med at bestemme Manningtallet i et konkret vandløb er, at kunne benytte Manningformlen til at beregne en Q/h -kurve til at forudsige vandstanden ved andre vandfø-



Figur 2. Manning's n som funktion af $V \cdot R$ (hastighed gange hydraulisk radius) ved skæring af strømrende i vandløb (Herredsbækken nær Års). Bemærk brændpunkt ved punktet $(V \cdot R, n) = (0,4 \text{ m}^2/\text{s}, \text{ca. } 0,3 \text{ s/m}^{1/3})$, (fra Larsen et al, 1990).

ringer, for eksempel at forudsige hvornår oversvømmelse finder sted ved store vandføringer.

Når man skal bestemme Manningtallet i et vandløb antager vi normalt, at vandet strømmer med konstant ensformig hastighed med "naturlig dybde", hvor der er ligevægt mellem tyngdekraftens komponent i strømretningen og friktionen (den samlede bundforskydningskraft). I denne situation er bunden, vandoverfladen og den hydrauliske energilinje parallelle. Men dette er en teoretisk situation som kun med tilnærmelse optræder i et virkeligt vandløb. I det virkelige vandløb varierer tværsnit og fald i større eller mindre grad, hvilket bidrager til usikkerheden på M .

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (4)$$

I et vandløb er Froudes tal Fr givet ved hvor V er tværsnittets middelhastighed, g er tyngdens acceleration ($g \sqrt{gD} = 9,81 \text{ m/s}^2$) og D er tværsnittets middeldybde. er bølgehastigheden for en lang overfladebølge i vandløbet.

I danske vandløb er Froudes tal mindre end én svarende til at strømmingen stort set altid er strømmende (modsat stygende), hvilket betyder, at ændringer (for eksempel stuvninger eller sænkninger forårsaget af tværsnitsvariationer) forplanter sig op i mod strømretningen og ikke modsat.

Da ændringer forplanter sig opad mod strømmen betyder det, at den vandstand vi observerer i et givet punkt i et vandløb er et resultat af forholdene nedstrøms for punktet ved snit A (se figur 1) og ikke af forholdene i selve punktet (og slet ikke af forholdene opstrøms for punktet). Den hydrauliske modstand og dermed Manningtallet er således ikke knyttet til et punkt, men til en kortere af-

ler længere strækning nedstrøms for punktet. Når vi derfor skal bestemme Manningtallet ved måling, er det derfor ikke korrekt at tage udgangspunkt i det tværsnit vi tilfældigvis har udvalgt at måle vandføringen i. Ikke sjældent sker målinger af praktiske grunde ved en bro og dette kan være udmærket selvom tværsnittet her ikke er typisk for de nærmeste nedstrøms tværsnit. Det faglig set rigtige tværsnit at indsætte i Manningformlen vil være et passende gennemsnitstværsnit og gennemsnitsfald nedstrøms for det punkt vi har udvalgt. Hvis vi bruger bro-tværsnittet til beregning af M og derefter til beregning af Q/h -kurven vil vi få en fejlbehæftet Q/h -kurve. Det er som sagt tværsnittet nedstrøms for broen der bør benyttes.

Denne fejl optræder ikke ved de direkte målte Q/h -kurver, som jo indeholder målte værdier for alle Q/h -punkter.

Manningtallet i grødefyldte vandløb afhænger af strømmingen

I grødefyldte vandløb vil vandet ved stigende hastighed presse grøden ned mod bunden, og derved formindsker Manningtallet. Dette har været beskrevet i den internationale litteratur i mere end et halvt århundrede (Chow, 1959), men har her i landet stort set kun været beskrevet via de undersøgelser der blev udført af Kristian Vestergaard, Jens-Ole Frier og undertegnede for snart 30 år siden (Larsen et al, 1990a; Larsen et al, 1990b). Dog er punktet medtaget i den nyeste faglige udredning om grødeskæring (Bach et al. 2016), hvor der henvises til undersøgelser udført af Thyssen et al (1990). I denne rapport ligger et stort hidtil upåagtet materiale, der bekræfter at Manningtallet er strømningsafhængigt.

Målinger har vist, at den parameter, der er bedst egnet til at vise hvorledes Manningtallet

varierer, er $V \cdot R$ (produktet af middelhastigheden og hydraulisk radius). På nedenstående figur 2 ses hvorledes Manning's n ($n = 1/M$) varierer med strømmingen ved et styret forsøg, hvor der ved udtømmning af en mindre sø ved Års i Himmerland til Herredsbækken kunne bestemmes Manningtal som funktion af $V \cdot R$. I disse forsøg blev der også foretaget skæring af strømrende som set ses på figuren.

Af figur 2 ses, at for situationen uden strømrende (øverste graf) ligger Manningtallet ($M = 1/n$) mellem 5 og 10. Det interessante ved figuren er at der eksisterer et brændpunkt for kurverne, hvor $V \cdot R$ er så stor at Manningtallet er ca. 30 svarende til et vandløb helt uden grøde.

Det er næppe rigtigt at generalisere ovennævnte resultat kvantitativt ud til alle andre vandløb, men kvalitativt set er forfatteren af denne artikel ikke i tvivl om, at såfremt Manningformlen benyttes til vurdering af oversvømmelse ved store vandføringer i vandløbene, så er de Manningtal, der er beregnet ud fra målinger ved normal vandføring for små i denne sammenhæng. En nærmere analyse af de mange eksisterende målinger kunne belyse dette nærmere.

Manningformlen i relation til den hydrometriske overvågning

Manningformlen benyttes ikke i den hydrometriske overvågning af vandløbenes vandføring, fordi overvågningsens primære formål er at monitorere afstrømmingens hidtidige forløb, og kun indirekte at forudsige fremtidige situationer. Nutidig overvågning (DCE og kommunerne) har primær fokus på transportberegninger af kvælstof og fosfor. Fortidens overvågning (Hedeselskabets Hydrometriske Undersøgelser) havde særligt afvandingen af landbrugsarealer som interesseområde.

Overvågningen bygger på en kontinuert måling af vandspejlsniveauet, samt at der ca. en gang månedligt måles sammenhørende Q/h -

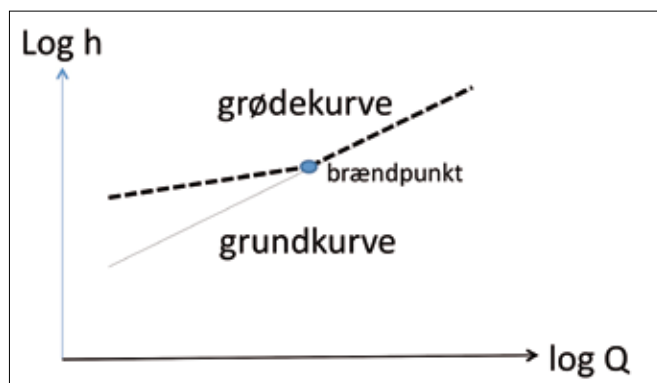
$$Q = K (h - h_0)^\alpha \quad (5)$$

værdier, der tilpasses et formeludtryk

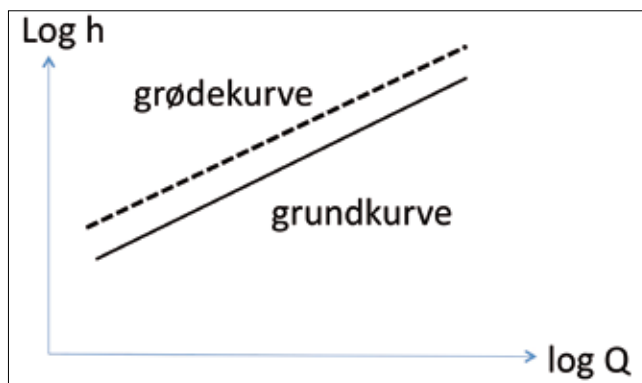
hvor Q er vandføringen, h er koten til vandspejlet og hvor K , h_0 og α er tilpassede konstanter. I vintersæsonen er disse uændrede i tiden. I grødesæsonen er modstanden større og varierer hurtigt og her må metoden modificeres. Kun de to mest almindelige metoder skal omtales i denne korte diskussion nemlig brændpunktmetoden og proportionalmetoden.

Brændpunktmetoden

Erfaringen viser, at K og α varierer, medens h_0 kan holdes konstant. For at bestemme K og



Figur 3. Q/h-kurve efter brændpunktmetoden, dobbelt logaritmsk afbildning



Figur 4. Q/h-kurve efter proportionalmetoden, dobbelt logaritmsk afbildning

α kræves to kendte Q/h-punkter på samme tidspunkt (dvs. inden for så kort tidsrum at grødesituationen er uændret). Da Q og h kun måles ca. en gang månedligt foreligger der således kun ét Q/h-punkt. Dette problem løses ud fra, at erfaringen viser at der eksisterer et fastliggende (hele sommeren) brændpunkt B, der er et fælles punkt for den aktuelle Q/h-grødekurve og grundkurven. Udtryk (1)

$$\log Q = \log K + \alpha \log (h - h_0) \quad (6)$$

kan omskrives:

Herved opnås, at Q/h-kurven bliver retlinet i dobbeltlogaritmsk afbildning. I denne afbildning fremstår de to Q/h-kurver som rette linjer (figur 3).

Baggrunden for antagelsen om eksistensen af brændpunktet er også her, at grøden ved stigende vandhastighed og vanddybde gradvis presses ned mod vandløbsbunden. Herved forsvinder grødens bremsende virkning til sidst helt og vandføringsevnen svarer til forholdene om vinteren. (Brændpunktet er en teoretisk hjælpe-størrelse, som ikke nødvendigvis kan eksistere rent fysisk. Det kan eksempelvis eventuelt ligge højere end terrænet omkring vandløbet).

Pointen er herefter, at det brændpunkt, der omtales i forrige afsnit i forbindelse med Manningtallet nødvendigvis må svare til det brændpunkt som erfaringsmæssigt gælder for de her omtalte traditionelle Q/h-kurver. Såfremt datamaterialet viser at et sådant brændpunkt eksisterer, bliver antagelsen om et strømningsafhængigt grøde-Manningtal underbygget.

Proportionalmetoden

Ved proportionalmetoden antages at kun konstanten K varierer med grødens vækst og det giver Q/h-kurver som ses på figur 3. Proportionalmetoden, som er lettere at benytte i et regneark fordi den kun kræver kendskab til et Q/h-punkt (ud over grundkurven),

vides at dække de normale og moderate flowvariationer tilfredsstillende. Denne simple metode er formentlig tilstrækkelig til bestemmelse af månedsgennemsnit (for eksempel ved transportberegninger af N og P). Svagheden er imidlertid at de ekstreme sommervandføringer overvurderes, fordi den værdi af K, der benyttes stammer fra en Q/h-måling, der i de fleste tilfælde vil være foretaget ved en lille vandføring, hvor grødens indflydelse har været relativ stor

Graden af overvurdering af de maksimale vandføringer er dårligt belyst og bør undersøges grundigere. Et stort ubearbejdet datamateriale foreligger.

Manningtallet set i lyset af hydrometriens metoder

Der synes at eksistere en vis forståelseskluft mellem de to verdener, hvor henholdsvis hydrometrien med dens klassiske Q/h-kurver arbejder og så den nyere vandløbshydraulik/hydrologi med dens edb-modellering mv. i stigende grad vinder ind. De to områder har øjensynligt forskellige målsætninger og prioriteringer af de hydrometriske forhold i vandløbene. Der er et samfundsmæssigt behov for at have et godt kendskab til vandføringer for transport af forurenende stoffer, men der er også i høj grad for kendskab til vandstandsforhold ved ekstreme vandføringer. Sidstnævnte synes at blive forsømt i stadig større grad.

Sammenfatning

I denne artikel er givet en beskrivelse af nogle af de punkter, som er årsag til at Manningtallet for vandløb fremstår at være en særdeles usikker størrelse. Konkret er fremhævet 3 punkter:

1. Der vil være 10 – 20 % forskel på Manningtallet hvis henholdsvis hydraulisk radius eller modstandsradius benyttes. De Manningtal som anbefales i fag- og lærebøger (samt i den internationale litteratur) bygger

på hydraulisk radius.

2. Når Manningtallet bestemmes ved måling på en lokalitet i vandløbet vil det være nedstrøms tværsnitsgeometri og nedstrøms fald der bør benyttes.
3. Manningtallet i grødefyldte vandløb vil variere med strømmingen (mere præcist både med strømhastighed og hydraulisk radius). Datamaterialet foreligger, men der mangler en bearbejdning, der kan vise hvilke Manningtal, som bør benyttes ved store vandføringer i grødeperioden.

Litteratur

- Bach, H., Baatrup-Petersen, A., Holm, P.E., Jensen, P.N., Larsen, T., Ovesen, N.B., Pedersen, M.L., Sand-Jensen, K. og Styczen, M. (2016). Faglig udredning om grødeskæring i vandløb. Videnskabelig rapport fra DCE, Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 188, 2016.
- Brorsen, M. og Larsen, T. (2009). Lærebog i Hydraulik. 2. udgave, Aalborg Universitetsforlag.
- Chow, V.T. (1959). Open Channel Hydraulics. New York, McGraw- Hill Book Co.
- Engelund, F.A. og Pedersen F.B (1978). Hydraulik. Den Private Ingeniørfond.
- Larsen T., Frier, J.O. and Vestergaard, K. (1990a). Discharge/stage relations in vegetated Danish streams. In WR White (ed.) Proceedings of International conference on river flood hydraulics. Wallingford, UK, 55-62.
- Larsen, T., Vestergaard K and Frier J-O. (1990b). Hydraulic aspects of vegetation maintenance in streams. XXIV IAHR-Congress, Madrid.
- Thyssen, N., Erlandsen, M., Kronvang, B., Svendsen, L. M. (1990). Vandløbsmodeller – biologisk struktur og stofomsætning. NPO-Forskning Nr. C 10. Miljøstyrelsen.
- USGS (1992). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey. WSP-Paper 2339.
- Yen, B.C. (2002). Open Channel Hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 128. No. 1.

TORBEN LARSEN. Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet. tl@civil.aau.dk