

Elektrifieringen av den danska statsjärnvägen

Tomas Larsson

Innehållsförteckning

Förord	3
Inledning	3
DSB och tågtrafiken	3
Energikrisen 1973	4
En ekonomisk jämförelse mellan diesel- och eldrift	5
En ny generation kontaktledningsnät	6
Det danska transmissionsnätet	8
DSB´s gamla flotta av diesellokomotiv	9
Motorvagnståg eller loktåg?	9
En ny generation lokomotiv	11
Blickarna riktas mot Västtyskland	11
DE 2500	12
1978: norrmännen köper lokomotiv från Tyskland	13
Danskarna följer norrmännen	14
Kravspecifikation för ett danskt el-lokomotiv	14
En ny generation västtyska höghastighetslokomotiv	15
Asynkronmotorn	17
Trefas med variabel frekvens - men hur?	18
EA	18
Priset för EA- lokomotivet	19
Den fortsatta utvecklingen	19
Sammanfattning	20
TEE visar vägen?	21
Data ellokomotiv EA 3000 och 120.0	22
Kronologi	23
Planerad elektrifiering DSB	23

Elektrifieringen av den danska statsjärnvägen

Förord

Rapporten är ursprungligen skriven för en dansk tidskrift, men blev något för omfattande varför den istället redovisas separat. Observera att kostnadsuppgifterna avser år 2006 och att beloppen anges i svenska kronor (1 skr = 1 kr = 0,81 dkr, 2006). Stora delar av rapporten återfinns i rapporten "Lok med asynkronmotorer" (se dito).

Inledning

Under sensvåren 1979 beslöts i Folketinget att en stor del av Danmarks järnvägsnät skulle elektrifieras. Ur ett internationellt perspektiv var dock beslutet inte så uppseendeväckande, det var tvärtom ett ganska sent sådant. I de tre grannländerna Norge, Sverige och Tyskland påbörjades elektrifieringsarbetet av fjärrtågsnätet redan under början av 1900-talet. Men just tack vare det sena beslutet blev det möjligt för DSB att gå in för det absolut modernaste inom elektrotekniken; DSB var ju inte bundet av några gamla traditioner eller bindningar till någon nationell industri.

Under 1984 ägde de första provkörningarna med elektriska lokomotiv rum och under december 1985 rullade det första elektriska tåget i trafik. Under 1984 gick emellertid DSB över till att börja satsa på tunga dieselmotorvagnståg och 1997 stoppades den fortsatta elektrifieringen. Under 2000 beställde DSB ytterligare 83 stycken tunga dieselmotorvagnstågsätt (IC 4) och ett år senare "droppes tanken...om en fuldt ud elektrificeret jernbane".

DSB och tågtrafiken

Det danska järnvägsnätet hade år 1930 cirka 529 mil bana. Under slutet av 1990-talet hade detta nät krympt till endast 213 mil, det vill säga mer än halverats. Å andra sidan ökade persontransportarbetet under samma period från 132 miljoner personmil till 478 miljoner personmil, vilket motsvarar en trafikökning av 262%. Men jämfört med de övriga transportmedlen, där bilåkandet ökat dramatiskt, **har järnvägen (exklusive Metron och S-tågen) idag en marknadsandel av endast 6%.**

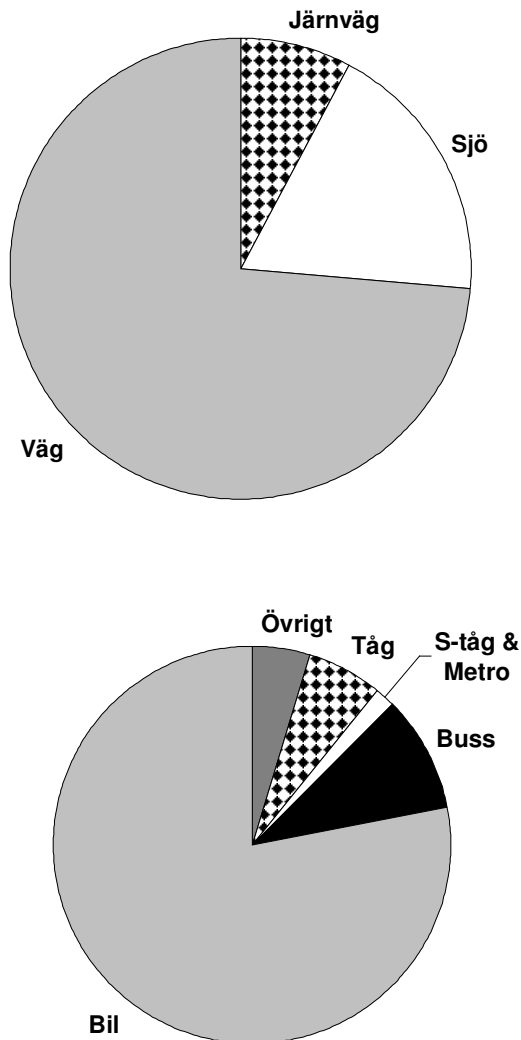


Fig 1 Järnvägens marknadsandel inom såväl gods- (övre cirkel) som persontrafik (undre cirkel), år 2004. Totalt (nationellt) 2,1 miljarder tonmil respektive 7.736 miljoner personmil.
Källa: Statistisk årsbok, 2007

Energikrisen 1973

Oljekrisen 1973 sände chockvågor genom hela det västerländska samhället och Danmark var vid den tiden nästan helt beroende av fossila bränslen.

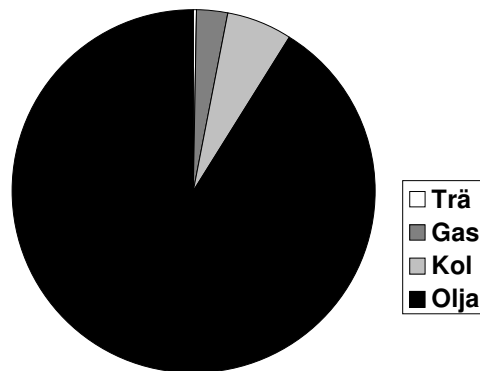


Fig 2 Nettoenergiförbrukningen i Danmark 1975. Totalt uppgick förbrukningen till 167 TWh.
Källa: Statistisk årsbok, 1977

Under oljekrisen bildades en dansk arbetsgrupp för att studera hur den framtida järnvägstrafiken skulle kunna bli mindre beroende av olja. Under 1978 publicerades en rapport som föreslog att en stor del av det danska stambananätet borde elektrifieras. Dessutom vinner man vid elektrifiering restid då elektriskt drivna tåg accelererar snabbare (på grund av betydligt högre effekt), samtidigt som underhållskostnader är lägre.

DSB räknade med att kunna reducera lok- flottan med uppemot 20% tack vare elektrifieringen. Den företagsekonomiska vinsten skulle bli 7% och den samhällsekonomiska vinsten hela 14%.

Ministern för offentliga arbeten fick genom Lag nr 206 bemyndigande "at gennemføre de fornødene foranstaltninger til indførelse af elektrisk drift på de fjerntrafikstrækninger ved DSB, hvor forholdene efter ministernes skøn taler herfor". Dock kunde DSB inte vänta på elektrifieringen då den skulle bli klar först under mitten av 1980-talet. DSB beställde därför även en ny generation sexaxliga diesellokomotiv (typ ME) med toppeffekten 2,0 MW och sth 160/ 175 km/h.

En ekonomisk jämförelse mellan diesel- och eldrift

Det är bland annat samhällsökonomin som är avgörande om en bana skall elektrifieras eller inte. En kilowatt-timme (kWh) kostar hos slutanvändaren cirka 1 krona medan motsvarande siffra är cirka 2 kronor per kWh vid dieseldriven trafik (motsvarande en verkningsgrad över 40%, med en specifik bränsleförbrukning på 200 g/kWh, där varje liter dieselolja väger cirka 840 gram). Det finns en kritisk punkt där totalkostnaderna för diesel- respektive eldrift skär varandra med avseende på antalet kilowatt-timmar (transportarbetet) per banmil. Över en viss trafikbelastning har eltåg lägre totalkostnad än dieseltåg. Frågan kompliceras dock då den skall sättas in i ett nätverksperspektiv (till exempel krav på genomgående, elektriska godståg eller miljökrav). Vid en internationell jämförelse är det inte heller självklart att elektrifiering av fjärrtågsnät är den naturliga lösningen.

Ibland hävdas att endast 31 % av Danmarks fjärrtågsnät är elektrifierat, vilket är ett lågt värde med centraleuropeiska mått mätt, men siffran är ännu lägre i till exempel Storbritannien, USA, Kanada och Australien. Till skillnad mot Västeuropa ger t ex de amerikanska godstågsoperatörerna sina ägare stora vinster, samtidigt som ytterst få godstågslinjer är elektrifierade. Inte ens vid högre hastigheter är det självklart att fjärrtågen måste vara eldrivna; i Storbritannien bedrivs en omfattande, högklassig höghastighetstrafik i 200 km/h med dieseldrivna fjärrtåg (IC 125) sedan början av 1970-talet. I USA demonterades till och med kontaktledningar under 1950 - talet.

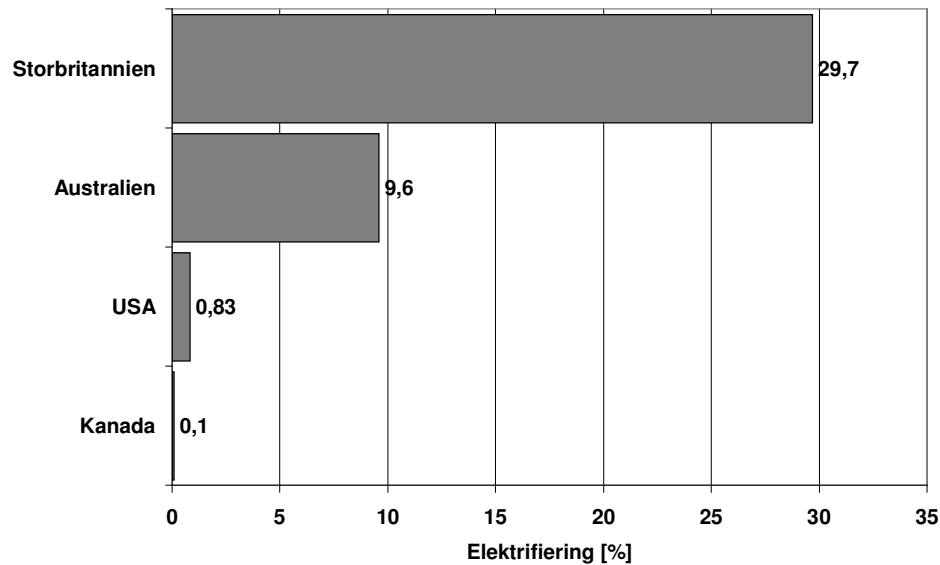


Fig 4 Andelen elektrifierade banor i några väst-länder
Källa: "Electric Blue", India Today, 26 augusti 2000

En ny generation kontaktledningsnät

Att elektrifiera ett järnvägsnät är mycket dyrbart. Dessutom indikerade en undersökning från Trafikstyrelsen 2006 att den danska elektrifieringen drabbats av stora kostnadsöverskridanden jämfört med "europeiska" elektrifieringsprojekt, vilket utlöste en politisk debatt.

För de återstående 95 spårkil (1) som planerades att elektrifieras i Danmark beräknades genomsnittskostnaden ligga i intervallet 4,8...16,0 tkr kronor/spårkil, **vilket totalt sett i genomsnitt innebär 6.046 skr/spårkil**. Banestyrelsens representant Ulrik Winge uppgav vid en hearing oktober 2001 att kostnadsfördelningen av den genomförda elektrifieringen på sträckan Nyborg- Fredericia (17,8 spårkil) var enligt följande:

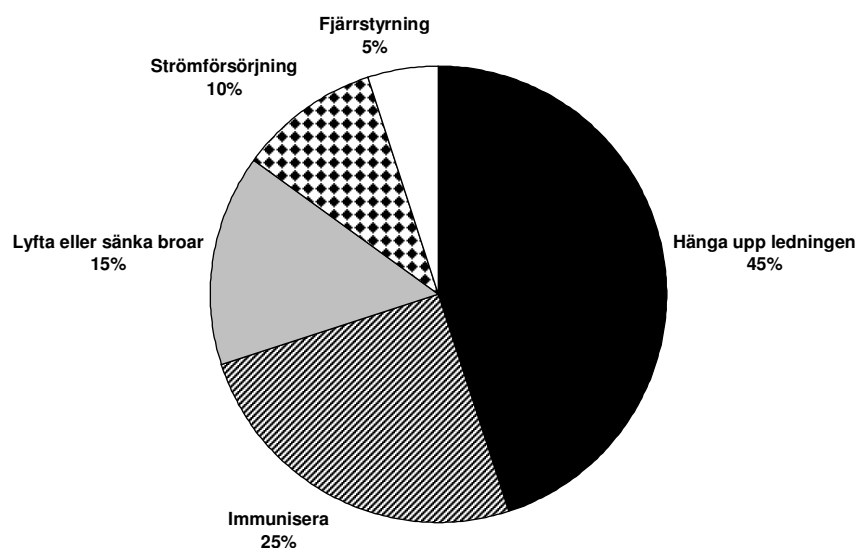


Fig 5 Relativ kostnadsfördelning år 2001 elektrifiering delsträckan Nyborg - Fredericia (totalt 17,8 spårkil)
Källa: "Høring om elektrificering af baner", Folketingets Trafikudvalg, 24 oktober 2001, sid 6

Kostnadsfördelningen ovan visar att inte ens hälften av totalkostnaden för elektrifiering består i att montera en kontaktledning, det vill säga bygga fundament, resa stolpe/brygga, montera upphängningsanordningar samt spänna upp ledningarna (= kontaktledning, bärtråd samt returledare).

(1)= se specifikation längst bak

Men den tidigare nämnda siffran 6.046 skr/spårmeter är, som nämndes, en hög siffra. Vid till exempel projekteringen under 1980-talet av en 40 mil lång höghastighetsbana (dubbelspår) i Texas mellan städerna Dallas och Houston låg motsvarande kostnad endast kring lite drygt hälften. Data för de bägge kontaktledningssystemen var följande:

anm			
Nation	USA	Danmark	
Delsträcka	Dallas- Houston	Nyborg- Fredericia	
Spårlösning	Dubbelspår	=>	
Ung. kontaktledn längd	800 km	178 km	= spårlängd (3)
Spänning (transm. nät) (4)	138 kV ~3	165 kV ~3	(132 kV öster om Storebælt)
Frekvens (transm. nät)	60 Hz	50 Hz	
Avstånd matn punkter	40 km	30 km	(genomsnitt hela nätet)
Benämning kontaktledning	Re 250	"DSB"	Re = Reihe (tysk. "Typ")
Spänning	25 kV	=>	1-fas
Frekvens	60 Hz	50 Hz	Nordamerika har 60 Hz generellt
Transformatoreffekt	15 MVA (2)	18 MVA (1)	per födepunkt
Sth	300 km/h	200 km/h	
Kontaktledning	koppar 120 mm ²	koppar 100mm ²	
Mastavstånd	65 m	max 60 m	
Masttyp	betong	Corten-stål	
Kontaktledningens höjd	5,30 m	5,50 m	mätt över rälsöverkant
Inspänning (5)	15 + 19 kN	12 + 12 kN	
Zick-zack	±300 mm	±200 mm	
Kostnad per spårmeter	3.290 skr/m	6.046 skr/m	USA: 1 USD = 8,00 SEK, index 1,767

Källor * "Elektrificering af fjernbanerne", Baneafdelingen Elektrificeringskoordineringen, DSB, januari 1985
 * "Das Projekt High-Speed-Rail: Dallas- Houston/Texas", Eisenbahntechnische Rundschau, nr 1/2, 1986
 (1)= kan kortfristig belastas med 41 MVA
 (2)= varje matningsstation skulle dessutom ha en reservtransformator på 7,5 MVA (summa 3 st)
 (3)= exklusive sidospår och stationsspår
 (4)= Högsta spänningen i Danmark 400 kV respektive Texas 345 kV, bör dock ej direktanslutas till järnvägsdrift
 (5)= kontaktledning + bärlina

Tabell 1 Jämförelse kostnader färdig kontaktledning för 25 kV i Danmark och Texas (USA), Prisnivå 2006
 US- dollarkursen 2006 har satts till mer "realistiska" 8,00 SEK

En fråga är varför DSB valde den förhållandevis låga kontaktledningsspänningen 25 kV. Under 1970-talet började nämligen godståg i USA att rulla under kontaktledningsspänningen 50 kV. Att däremot DSB, som antytts i debatten flera gånger, borde ha valt **den lägre** spänningen 15 kV 16 2/3 Hz (som i Sverige, Norge och Tyskland) skulle ha orsakat både högre effektförluster samt högre kapitalkostnader (omformare i mångmegawatt-klassen, från 50 Hz till 16 2/3 Hz). Dessutom lär det knappast finnas något land i världen som i större utsträckning satsar på frekvensen 16 2/3 Hz, helt enkelt på grund av dålig driftekonomi (tung transformatorer, höga omformar-kostnader etc). Den enda egentliga fördelen ur elektroteknisk synvinkel med 16 2/3 Hz istället för 50 Hz är lägre induktivt motstånd (= spänningsfall) på grund av lägre frekvens (den optimala lösningen ur induktiv synvinkel är likspänning, men än saknas kompakt utrustning för att sänka högspänd likström till lägre spänningsnivåer inne i fordon).

Höghastighetslinjen mellan Dallas och Houston byggdes aldrig. Kalkylen från 1986 är emellertid intressant på flera sätt, men baserade sig på att ingen tågtrafik pågick under själva byggtiden. För DSB's del planerades kontaktledningen att byggas under korta intervall på spår i trafik och det är uppenbart att korta byggtider (främst nattetid) ökar kostnaderna och även olycksriskerna. För att underlätta ombyggnation gjöts inte stolpfundamenten på plats utan slogs ned i banvallen till ett djup av uppemot fem meter under markytan, med en kraftig, spårburen påslagningsmaskin. Vidare användes uppemot 50 meter långa fackverksbryggor som med mobilkran nattetid lades över bangårdar.

Slutresultatet är dock anmärkningsvärt, då Texas-banans kontaktledning endast kostade cirka 3.290 skr per spårmeter (där den klarade topphastigheten 300 km/h) medan den danska kontaktledningen kostade hela 6.046 skr/m, eller 84% mer.

Under 1980 presenterades i tidskriften NJT en kalkyl för 210 mil elektrifierad bana i Danmark. Kostnaden skulle totalt uppgå till 6.126 mkr eller motsvarande 2.916 mkr/ban-meter (d v s ungefär som Texas-banan).

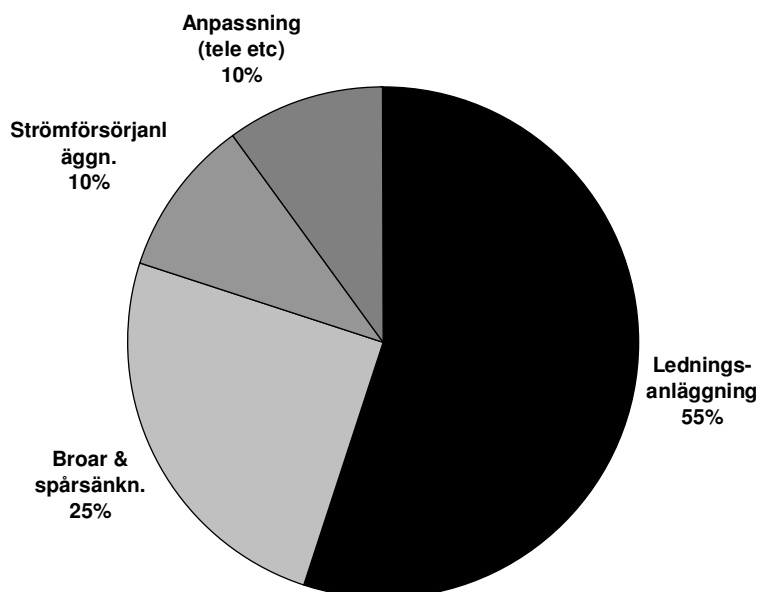


Fig 6 Kostnadsfördelning elektrifiering 210 mil bana DSB enligt en plan från 1980 (källa: Nordisk Järnbane Tidskrift). Totalt uppskattades kostnaden ligga kring 6,1 mrd kr (2006 års prisnivå) och 210 mil bana skulle elektrifieras.

Det danska transmissionsnätet

För matningen av kontaktledningsnätet är den enklaste metoden att med jämna mellanrum (3...5 mil) ansluta järnvägens kontaktledningsnät till det nationella kraftledningsnätet. Spänningen i det danska transmissionsnätet är antingen 400 kV (samma som i Sverige), 165 kV (Jylland och Fyn) eller 132 kV (öster om Stora Bält). Då DSB's kontaktledningsspänning är betydligt lägre (25 kV) måste spänningen transformeras ner.

Vid varje matningspunkt finns en 18 MVA enfastransformator som är ansluten mellan två av det nationella transmissionsnätets trefas- ledningar. En av utmaningarna är att på ett jämnt sätt belasta nätet (faserna). Från transformatorstationen (cirka 5 km från järnvägen) leds den nedtransformerade spänningen via en 25 kV- markkabel upp till en kontaktledningsmast, där en fördelningsstation distribuerar strömmen till olika sektioner.

Danmark är ur kraftförsörjningssynpunkt uppdelat i två "synkroniseringsområden"; Själland och det övriga landet. Själland är elektriskt synkroniserat med Sverige (och indirekt Norge) via växelströmskablar på havsbotten under Öresund (strax norr om Helsingborg), medan Jylland och Fyn är synkroniserade med Centraleuropa genom tre stycken växelströmsförbindelser (spänningarna 400, 220 och 150 kV), som passerar den dansk- tyska gränsen vid Södra Jylland och som är anslutna till stationen Kassö utanför Åbenrå samt Enstedtsverket (kraftverk, 150 kV). Dock matas Jylland även via ett antal *likspänningsförbindelser* från Norges sydkust ("Kross-Skagerak") och från Sveriges västkust (Konti-Skan). På så vis kan två osynkroniserade 50 Hz-nät försörja varandra (den västra delen av Danmark är på nationell nivå inte ens ansluten till Själland).

Senare har Själland via en 400 kV *likspänningsförbindelse* anslutits till Tyskland (Kontek) och det pågår diskussioner om att även direkt länka samman Danmarks västra och östra del med en likspänningskabel via havsbotten hos Stora Bält.

Nedan framgår fyra likspänningsförbindelserna mellan den skandinaviska halvön samt Danmark:

namn	station 1	station 2	kabellängd	luftledningslängd	spänning	max effekt	start
Konti-Skan	Vester Hassing	Lindome	8,7 mil	8,9 mil	250 kV	250 MW	1964
Cross-Skagerak	Tjele	Kristiansand	13,0 mil	10,0 mil	250 kV	1.000 MW	1977
Konti-Skan 2	Vester Hassing	Stenkullen	8,7 mil	6,0 mil	285 kV	300 MW	1988
Cross-Skagerak 3	Tjele	Kristiansand	13,0 mil	10,0 mil	350 kV	500 MW	1993
			43,4 mil	37,8	2.050 MW		

Tabell 2 Förteckning likspänningslänkar från Jylland till utlandet. Totalt är maxeffekten över 2 GW (det vill säga 2.000+ MW). **Observera att effektlödena kan gå i bägge riktningarna.**

I ett dokument från DSB ("Elektrificering af fjernbanerne", januari 1985) angavs att strömförbrukningen (31 december 1982) för järnvägens del motsvarade 2,5% av Danmarks totala elförbrukning.

DSB's gamla flotta av diesellokomotiv

I princip hela DSB's diesellokflotta under 1970-talet var utrustad med tvåtaktsdieselar från amerikanska GM. GM- motorerna hade sitt ursprung i en generation tvåtaktsdieselar som lanserades i USA redan under 1930-talet (serie 567). Tvåtaktsmotorer är generellt sett mycket driftsäkra men de har en stor nackel; de bränner upp smörjoljan som sedan går ut via avgaserna, mer eller mindre förbränd. De blå moln som släpps ut av diesellokomotiv är olyckliga ur miljösynpunkt (GM lanserade dock 1998 en ny generation fyrtaktsdieselar med beteckningen EMD 265, som ej har dessa problem).

Under slutet av 1970-talet fanns inom DSB en stor flotta av sexaxliga, dieselelektriska linjelokomotiv. Ända fram till 1978 pågick leveranserna av de välkända, sexaxliga MZ- lokomotiven. Den första delserien MZ-lokomotiv började att levereras redan 1967 och hade då en maximal dieselmotoreffekt på 2.426 kW och en topphastighet av 143 km/h. Hos den sista delserien hade effekten höjts till 2.867 kW och topphastigheten till 165 km/h. Effekthöjningen var möjligt genom att den gamla motorn med sexton cylindrar ersattes av en tjugocylindrig motor (serie 645).

Gemensamt för efterkrigs-generationen diesellok, som levererades under perioden 1954...1978, var att de var utrustade med dieselelektriska kraftaggregat från amerikanska GM. Under 1973 uppstod dock oljekrisen. Med ett oelektrifierat fjärrtågsnät och en stor flotta av bränsletörstiga diesellokomotiv var det naturligt att järnvägens oljeberoende hamnade i fokus. En elektrifiering av det danska järnvägsnätet blev intressant.

Motorvagnståg eller loktåg?

Det har länge inom DSB diskuterats om motorvagnståg eller loktåg är mest lämpat för långdistans persontrafik. För godstågens del har dock loktåget alltid varit standardlösningen. Ofta kan dieselloket dessutom dra såväl gods- som persontåg, vilket minskar kapitalkostnaderna per mil.

Redan under början av 1930-talet lanserades i Tyskland en ny generation tunga motorvagnståg med toppfarter i reguljär trafik uppemot 160 km/h. Det var uppenbart att det fanns många fördelar med den nya motorvagnstypen och även DSB beställde en likartad motorvagnstyp. Från tidtabellsskiftet den 15 maj 1935 började de nya "Blixttågen" (Lyntog) att rulla mellan den danska huvudstaden och Jylland. Med sina dieselmotorer kunde Lyntogen uppnå hastigheter uppemot 120 km/h.

Nästa generation Lyntog, som lanserades cirka tre decennier senare, utgjordes dock av loktågstyp (lok typ MA) liksom tredje generationen prototyp- Lyntog under slutet av 1970-talet. Med tanke på att det redan fanns en stor diesellokflotta inom DSB under slutet av 1970-talet var det naturligt att DSB fortsatte planeringen för två nya generationer lokomotiv; en dieselelektrisk variant (ME) och en elektrisk (EA).

Genom seklerna har Stora Bält utgjort ett hinder i kommunikationerna mellan huvudstaden och de västra landsdelarna, så även för järnvägen. Detta har starkt påverkat DSB's val av tågsätt. Problemen med att lasta i och ur färjorna ledde till att en ny generation "stor-färjor" under 1970-talet anskaffades ("IC 74") med en spårlängd **per färjespår** på hela 140 meter (tågen behövde inte kopplas isär, förutom loket). Men trots detta kvarstod problematiken med att vagnar skulle dras i och ur och säkras, samt lok som skulle kopplas till och från. Den längst gångna lösningen vad gäller loktåg utgjordes av ett femvagnars prototyptåg (totalt 130 meter) som snabbt och elegant kunde skjutas in på ett färjespår.

Ett dieseldrivet, femvagnars Lyntog av tredje (prototyp-) generationen (1980) hade följande data:

Beteckning	Lyntog Generation 3 (prototyp)
Längd över stötytor	153,0 m (inkl ME- lokomotiv)
Antal säten (1)	332 platser
Sth	160 km/h
Tomvikt	361 t (inkl lokomotiv)
Tomvikt per sittplats	1.087 kg/sittplats
Investering per sittplats	200 tkr/sittplats (prisnivå 2006)

(1)= enhetsklass, 2 + 2 i bredd, 105 cm stolavstånd

Under 1984 bestämdes dock att DSB skulle gå in för en ny generation dieseldrivna, tunga **motorvagnståg** med beteckningen IC 3. Ett tågsätt med 280 sittplatser (= 2 stycken IC 3- enheter) hade följande data:

Beteckning	IC 3
Längd över stötytor	117,6 m
Antal säten (1)	280 platser
Sth	180 km/h
Tomvikt	194 ton
Tomvikt per sittplats	693 kg/sittplats
Investering per sittplats	361 tkr/plats (prisnivå 2006)

(1)= enhetsklass, 2 + 2 i bredd, 105 cm stolavstånd

Som framgår av tabellerna ovan så är IC 3:an nästan dubbelt så dyr per sittplats räknat som de konventionella loktågen. Å andra sidan är IC 3:an betydligt lättare per sittplats räknat men då får man komma ihåg att viktspekten (år 1980) inte var någon viktig faktor vid framtagandet av tredje generationen lokdragna prototyp- Lyntog. Under 2000 beställdes en ny generation dieseldrivna motorvagnståg (IC 4) från Italien och med topphastigheten något förhöjd till 200 km/h (istället för IC3:ans sth 180 km/h). IC 4:ans data ser ut enligt följande:

Beteckning	IC 4
Längd över stötytor	86,32 m
Antal säten (1)	208 platser
Sth	200 km/h
Tomvikt	147 ton
Tomvikt per sittplats	707 kg/sittplats
Investering per sittplats	444 tkr/plats (prisnivå 2006)

(1)= enhetsklass, 2 + 2 i bredd, 105 cm stolavstånd

Jämfört med den tredje generationen lokdragna Lyntog är den specifika investeringskostnaden för IC 4 långt över den dubbla (444 tkr/plats) vilket är ett samhällsekonomiskt problem. Danmark är dock långt ifrån ensamt om denna problematik. Ett intressant, dieseldrivet alternativ är en fortsatt användning av konventionella, sexaxliga diesellokomotiv (t ex ME) med en effekt kring 2.000 kW men med en ny generation lättviktsvagnar:

Beteckning	Lyntog generation 4	(förf. förslag)
Längd över stötytor	153,0 m	(ME-lok samt 5 st 26,4 m vagnar)
Antal säten (1)	332 platser	
Sth	200 km/h	
Tomvikt	245 t	(25,0 t per vagn)
Tomvikt per sittplats	738 kg/sittplats	
Investering per sittplats	200 tkr/plats (prisnivå 2006)	

(1)= endast 2 klass säten, 2 + 2 i bredd, 105 cm stolavstånd, inkl handikapp-WC

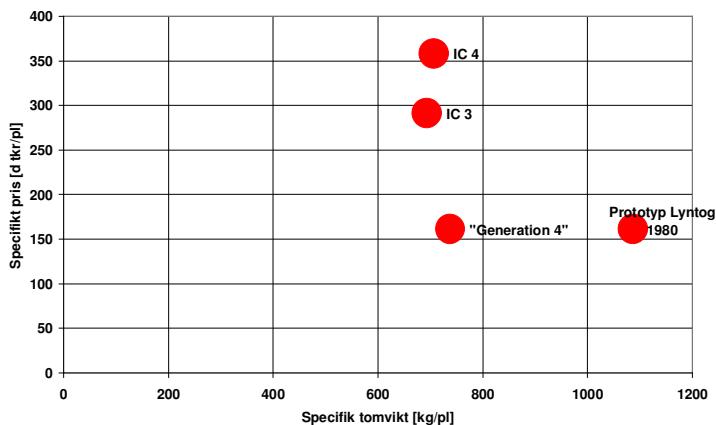


Fig 7 En jämförelse av specifik tomvikt och specifik investeringskostnader - bägge per sittplats mätt - för de fyra tågsätten IC 3, IC 4, Lyntog 1980 samt ett förslag fjärde generation Lyntog. Prisnivå 2006. Observera att priserna är i danska kronor (1 DKK= 1,24 SEK)
Källa: författaren

Som framgår av diagrammet ovan är motorvagnstågen IC 3 och IC 4 i särklass dyrast per sittplats räknat medan Prototyp-Lyntoget från 1980 är i särklass tyngst. Förslaget med en fjärde Generation Lyntog med samma specifika tomvikt som IC 3 och IC 4 men endast halva investeringskostnaden är även inritat.

En ny generation lokomotiv

Tidigare nämndes att ett dieseldrivet lokomotiv kan uppnå en verkningsgrad över 40%, medan ett elektriskt lokomotiv har en verkningsgrad kring 80%. Det finns med andra ord stora miljövinster med att generera elströmmen centralt i ett fåtal stora, kraftverk (olja- eller koleldad ångpanna alternativt kärnreaktor, samt ångdrivna generatorer) istället för att varje lokomotiv har sitt eget lilla kraftverk (= dieselmotor och generator) eller, ännu hellre, ren vattenkraft från de svenska och norska fjällarna.

DSB:s diesellokomotiv baserade sig i grunden på en generation lokomotiv som var sexaxliga och utrustade med tvåtaksmotorer från amerikanska GM. Elutrustningen varierade mellan modellerna men transmissionen var alltid dieselelektrisk, det vill säga en dieselmotor drev en generator som i sin tur - via reglerutrustning - drev fyra till sex stycken likströmsmotorer. Det första MY-lokomotivet levererades 1954 och ännu under mitten av 1970-talet pågick leveranserna av MZ:an.

GM-lokomotiven (företaget har numera återgått till sitt ursprungliga namn EMD, med huvudägaren Caterpillar) är mycket slitstarka och baserar sig på väl beprövade och slitstarka konstruktioner. GM:s lokomotiv-serie kan utan större modifieringar användas för att dra extremt tunga godståg i såväl arktiskt klimat som ute i öknen. GM:s standardlokomotiv är dock främst avsedda för godståg i låga hastigheter. Prov i USA under 1970-talet, som gick ut på att använda GM-lokomotiv i hastigheter uppemot 190 km/h, resulterade dock i för höga spårkrafter samt orolig gång.

De danska GM-lokomotiven hade betydligt lägre axellast (ofta under 20 ton) och topphastigheten 133 km/h (senare höjd till 165 km/h med MZ). Emellertid var påfrestningarna på spåren ändå förhållandevis stora och elmotorerna krävde underhåll. Dessutom började MY-lokomotiven bli slitna och dess gamla, oljeeldade ångvärmesystem började te sig ålderdomliga (allt fler personvagnar utrustades dessutom med elektrisk värme). DSB började se sig om efter en ny generation lokomotiv, främst för att ersätta sina gamla diesellokomotiv.

Blickarna riktas åter mot Västtyskland

Inför upphandlingen av nästa generation danska ellokomotiv studerade DSB noggrant den internationella marknaden. I Sverige pågick som bäst leveranserna av fyraxliga ellokomotiv av typen Rc från tillverkaren Asea. Dock var tekniken baserad på 1960-talets teknologi med likströmsmotorer och Asea var långt ifrån att kunna erbjuda en asynkronvariant av Rc-loket för leverans (senare under 1980-talet genomfördes dock under en period svenska försök med en asynkronvariant av det svenska Rc-lokomotivet, benämnt Rz. Vid sammanslagningen av BBC med Asea fanns det dock ingen anledning att fortsätta utvecklingen av Rz eftersom BBC låg långt före Asea inom området).

En annan stor tåg tillverkningsnation var Frankrike. En rad både fyr- och sexaxliga ellokomotiv fanns för farter uppemot 240 km/h (franska statsjärnvägens lokomotiv typ CC 40100). Men landets industri kunde heller inte erbjuda lokomotiv med asynkron drift.

Ungefär samtidigt med oljekrisen 1973 pågick i Tyska riket en intensiv utveckling av en ny generation elektriska lokomotiv med effektiva och underhållsfria drivmotorer av asynkrontyp. Dessutom pågick mycket forskning inom området löpverk. I ett av dessa projekt utvecklades en ny generation dieselelektriska lokomotiv med beteckningen DE 2500, vilket fångade DSB's intresse.

DE 2500

Under 1965 började de två tyska företagen BBC och Rheinstahl Transporttechnik (senare Henschel) att tillsammans utveckla en ny generation dieselelektriska lokomotiv. Målet med den nya lokserien var ett nytt koncept som skulle vara mycket flexibelt såväl vad gäller spårvidd som vikt och antal axlar samt kräva mindre underhåll. Loket skulle klara såväl person- som godståg, axellaster från 12,5 ton och spårvidder från 1.000 mm. Den första provkörningen av den nya generationen dieselelektriskt lokomotiv, benämnt DE 2500, ägde rum den 30 juni 1970.

Totalt tillverkades tre stycken DE2500-lokomotiv (där "2500" stod för antalet hästkrafter i dieselmotorn) enligt följande:

- * Vita jätten (sexaxligt)
- * Blå bocken (sexaxligt, tillverkningsår 1973)
- * Röda oxen (fyraaxligt, tillverkningsår 1973)

Lokomotivet byggdes upp kring ett kraftaggregat som bestod av en tolvcyldring, turboladdad dieselmotor från den västtyska motortillverkaren MAN. Dieselmotorn hade effekten 1.840 kW och den 8-poliga synkrongeneratorn från BBC, som var ansluten till dieselmotorns vevaxel, hade den maximala effekten 1.800 kW.

Efter likriktning av spänningen från synkrongeneratorn via en trefasbrygga (dioder), matades de fyra trefasväxelriktarna med likspänningen 1.200 volt. För att dämpa spänningsripplet glättades den i ett stort kondensatorpaket (filter).

Varje växelriktare bestod av tre grundenheter (en för varje fas). Grundenheterna rymdes i ett skåp med golvmått 220 x 150 cm, samt höjden 210 cm. Skåpet innehöll fyra stycken trefasväxelriktare á 700 kVA (det vill säga 2.800 kVA). Samtliga fyra växelriktare var anslutna till en gemensam trefas-ledning, där frekvensen till motorerna kunde varieras i intervallet 0,1.....125 Hz, där den senare frekvensen användes vid full hastighet.

Den nya asynkronmotorn QD 335 N4 var mycket robust. För normalspårsversionen vägde varje asynkronmotor 1,8 ton och hade effekten 375 kW. Motorn hade en diameter av 66 cm och längden 119 cm. För smalspårsversionen fanns en nedbantad version med en effekt av endast 250 kW, effektmässigt ungefär som hos det danska Öresunds- motorvagnståget X31 (265 kW).

Beteckning	QD 335 N 4
Tillverkare	BBC
Antal poler	4 st
Spänning	1.000 V
Vikt	1,80 ton

Boggierna var av typen Flexifloat och fanns, som tidigare nämnt, i dels en tvåaxlig och dels en treaxlig version. Loktillverkaren Rheinstahl hade dock redan februari 1965 börjat att leverera en ny generation 110 ton tunga, sexaxliga ellokomotiv av typen E103 till DB. Lokomotivet hade topphastigheten 200 (250) km/h.

Det intressanta ur boggisynpunkt var att tillverkaren Henschel på grund av kombinationen hög axellast (18,3 ton), kort axelavstånd (225 cm) och hög topphastighet (200 km/h) tvingats lägga ner mycket stor omsorg på att utveckla en boggi som orsakade acceptabla spår-/hjulkrafter, speciellt vid snäva kurvor. Så till exempel "svävade" hela den enorma lokkorgen hos E103 på sexton stycken gigantiska spiralfjädrar. Detta gjorde att rörligheten mellan boggi och lokkorg i sidled var relativt stor (en person kunde sätta hela den väldiga lokkorgen i svängning i sidled när anslagsstoppen var bortmonterade!). I längsled förankrades varje boggie med två stycken stänger, allt för att kunna ta upp drag- och tryckkrafter vid acceleration och inbromsning. För att minska omfördelningen av axellasterna inom boggin vid acceleration låg stängen på en låg nivå över rälsens överkant (mindre vridmoment).

Nedan visas en jämförelse av de treaxliga Henschel- motorboggierna hos E103- och DE 2500- lokomotiven:

Loktyp	103.0	202 (DE 2500)
Första leverans	1965 (1)	1970 (1)
Största tillåtna hastighet	200 (250) km/h	140 km/h
Axelavstånd	2.250 + 2.250 mm	2.000 + 2.000 mm
Axellast	18,3 t	14,0 t
Hjuldiameter-nytt	1.250 mm	1.100 mm
Primärfjädring	spiralfjäder	=>
Förankring axelbox	länk	=>
Antal dito, per axelbox	2 st	1 st
Sekundärfjädring	spiralfjäder	=>
Förankring boggie	stång	=>
Antal stänger dito	2 st	1 st
Överkant sek fjädring	ca 1,70 m rök	ca 1,50 m rök
Kontinuerlig effekt (boggi)	2.975 kW	1.125 kW
Motorbeteckning	WB 368/17	QD 335 N4

Tabell 3 Jämförelse treaxlig motorboggi med elmotorer hos lokomotiven E103 och DE 2500.

(1)= prototyp

Även infästningen av axelboxarna ägnades stor omsorg i 103-lokomotivet. Genom detta kunde "...ein gewisses Querspiel und eine leicht radiale Einstellung..." (ung "ett visst tvärspele och en liten radial inställning...") av hjulen äga rum, nog så viktigt längs den gamla nordsydliga stambanan i Västtyskland, som utgjordes av många och snäva kurvor speciellt på sträckan Hannover - Würzburg (en tidigare sekundärbana som efter Tyska rikets fall plötsligt blev en huvudbana i den nya Förbundsrepubliken).

E103-lokomotivets boggilösning användes även till stora delar hos DE 2500-lokomotivet. Liksom E103 var såväl primär- som sekundärfjädringen hos DE 2500 av konventionell spiralfjädertyp och axlarna styrdes i längsled med en stång. Sekundärfjädringens överkant låg relativt högt upp; nästan 1,60 meter mätt över rälsöverkant.

Boggin var konstruerad för max 140 km/h, men senare beställde t ex DSB och NSB lokomotiv med denna boggityp, dock med toppfarten höjd till 175 km/h (den senare topphastigheten hos de danska lokomotiven typ EA och ME).

De tre DE 2500-lokomotiven genomgick omfattande provkörningsprogram, såväl Västtyskland som i utlandet.

1978: norrmännen köper lokomotiv från Västtyskland

Under 1977 provkördes det tyska DE 2500- lokomotivet i såväl Danmark som Norge och under **november 1978 kom det slutliga genombrottet i Skandinavien då den norska statsjärnvägen (NSB) beställde en ny generation sexaxliga, dieselektriska lokomotiv med asynkromotorer och Flexifloat- boggi**. Tillverkaren av den mekaniska delen var Henschel medan BBC (tillsammans med BBC- företaget NEBB i Strømmen, strax norr om Oslo) tillverkade den elektriska delen.

NSB valde dock även för den nya lokserien Di 4 att använda en amerikansk, tvåtakts dieselmotor som lanserades under 1960-talet. Motorn hade något större specifik slagvolym (645 kubiktum per cylinder, samma som för de danska MZ- lokomotiven) än Di 3-loket. Föregångaren Di 3 hade emellertid bara 567 kubiktum per cylinder (tillverkningsstart 1930-talet). Bägge motorerna var dock sextoncylindriga.

För den elektriska transmissionen valde NSB en **växelströmgenerator** för det nya Di4- lokomotiv, vilket dock medförde att generatoren inte längre kunde användas som startmotor (likströmgeneratorn i Di3 kunde använda lokomotivets batterier vid starttillfället).

Valet av elmotorer med tillhörande utrustning blev dock helt nytt då asynkronmotorer beställdes. Vidare övergavs den gamla mekaniska delen från svenska Nohab då loktillverkaren Henschel i Kassel valdes som leverantör av den mekaniska delen. Vid ett eventuellt senare ersättande av den gamla 16-cylindriga dieselmotorn med en större kommer dock den fulla effekten hos elmotorerna att kunna utnyttjas.

Det norska Di 4-lokomotivet hade följande huvuddata:

Längd över stötytor	20.800 mm
Boggjavstånd	11.930 mm
Sth	140 km/h
Axelarr	Co-Co
Vikt	113 t (inkl 67% bränsle)
Dieselmotor	645 E3B, V-16 (GM)
Dieselmotoreffekt	2.410 kW
Max effekt vid räl	1.950 kW
Elmotor, beteckning	QD 335 N4 AB (BBC)

Som framgår av data ovan var drivmotorerna från BBC och typen samma som hos DE2500-lokomotivet. Dieselmotorn var dock en konventionell tvåtaktsmotor från amerikanska GM med sexton cylindrar.

Det norska lokomotivet sattes främst in i fjärrtågstjänst på det oelektrifierade nätet i norra Norge. Då tjälskotten var många, nederbörden i form av snö omfattande och kurvorna snäva så fick loket en rad speciallösningar. Bland annat hängdes elmotorer och axlar in på ett extra mjukt sätt med "...eine Radialeinstellung der Radsätze in Kurven und somit geringe Gleiskräfte und minimalen Spurkranzverschleiss zu erreichen." (ung "...en radiell inställning av hjulaxlarna i kurvor och därmed nå mindre spårkrafter och minimalt hjulflänsförslitning", källa: ETR, "Die dieselelektrische Lokomotive Di 4 der Norwegischen Staatsbahn", nr 6 1981, sid 490).

Samtidigt började de första, danska gamla diesellokomotiven (typ MY) att närma sig slutet på sin livslängd. Däremot var MZ-lokomotiven, åtminstone i den tredje delserien, i princip nya. Det fanns med andra ord ett behov av en ny generation diesellokomotiv för att ersätta de äldsta från 1950-talet.

Danskarna följer norrmännen

Under 1979 beställde DSB en första delserie sexaxliga diesellokomotiv med beteckningen ME. Lokomotiven levererades under perioden 1981...1985. Jämfört med Di 4 fick ME en mycket elegant exteriör med bland annat släta ytor och en modern front. Vidare höjdes topphastigheten från 140 till 175 km/h. I övrigt var lokomotiven i princip lika varandra.

Kravspecifikation för ett danskt ellokomotiv

Till skillnad mot de tre grannländerna - där samtliga har ett gammalt kontaktledningsnät med den udda frekvensen 16 2/3 Hz - valde Danmark istället att använda standardfrekvensen 50 Hz och en betydligt högre spänningsnivå på 25.000 volt. Genom detta minskades effektförlusten och slopadet av omformning av växelströmmen minskade kostnaderna ytterligare. Men även det faktum att Danmark inte hade någon dominerande, nationell tillverkare av spårfordon gjorde att DSB kunde vända sig direkt till de stora tågverkarna utomlands och beställa den absolut senaste tekniken.

Efter beslutet maj 1979 att en stor del av det danska stamnätet skulle elektrifieras uppstod ett behov av nya ellokomotiv. DSB befann sig i själva verket i en mycket gynnsam situation då antalet potentiella lokleverantörer var omfattande. För att kunna gå vidare i valet av lämpligt ellokomotiv ställde DSB följande krav på det nya lokomotivet:

- * 2.000 ton godståg "satt i rörelse"
- * 1.100 ton snabbt godståg i 100 km/h i 5 promille motlut
- * 540 ton, 12 vagnars passagerartåg (IC) i 160 km/h
- * 360 ton passagerartåg (regionaltåg) i 120 km/h

Två av de svåraste belastningskraven var dels att få ett stillastående, 2.000 ton tungt godståg "att börja rulla" och dels att kunna hålla 160 km/h med ett 12-vagnars IC-tåg (45 ton bruttovikt per vagn). Det finns flera teorier hur persontågens motstånd kan beräknas men en klassisk formel är den tyska Sauthoff-formeln, som säger följande:

$$R_{\text{VAGNAR}} = ((1,9 + 0,0025 * v) * m_{\text{VAGNAR}} + 0,48 * (n + 2,7) * 1,45 * \left(\frac{v + 15}{10}\right)^2) * G \text{ där}$$

R_{VAGNAR} = gångmotstånd personvagnar [kN]
 v = hastighet [km/h]
 m_{VAGNAR} = bruttovikt, totalt [t]
 n = antal personvagnar [st]
 G = gravitation [9,81 m/s²]

(siffran 15 i täljaren anges 15 km/h motvind)

Källa: "Fahrzeuge und ihre Unterhaltung"

Motsvarande formel för det tyska, fyraxliga ellokomotivet 120 kan antas gälla även för EA:

$$R_{\text{LOK}} = (4,5 * m_{\text{LOK}} + 4,72 * (v * 0,1)^2) * G \text{ där}$$

R_{LOK} = gångmotstånd lokomotiv [kN]
 m_{LOK} = vikt [t]
 v = hastighet [km/h]
 G = gravitation [9,81 m/s²]

Källa: "Eisenbahntechnische Rundschau", nr 1/2, 1977

Om vi använder dessa formler för ett fjärrtåg med 12 vagnar, vagnbruttovikten 540 ton, lokvikten 80 ton (det vill säga EA-lokomotivet) och hastigheten 160 km/h så erhåller vi följande resultat:

$$R_{\text{VAGN}} = ((1,9 + 0,0025 * 160) * 540 + 0,48 * (12 + 2,7) * 1,45 * \left(\frac{160 + 15}{10}\right)^2) * 9,81 = \underline{\underline{65,3 \text{ kN}}}$$

$$R_{\text{LOK}} = (4,5 * 80 + 4,72 * ((160 * 0,1)^2)) * 9,81 = \underline{\underline{12,2 \text{ kN}}}$$

$$R_{\text{TÅG}} = R_{\text{VAGN}} + R_{\text{LOK}} \Rightarrow 65,3 + 12,2 = \underline{\underline{77,5 \text{ kN}}}$$

$$P_{\text{TÅG}} = F_{\text{TÅG}} * v \Rightarrow 77,5 * 160 / 3,6 = \underline{\underline{3.444 \text{ kW}}}$$

Värdet 3.444 kW är den effekt som krävs för att hålla tåget rullande i jämn hastighet vid 160 km/h. Vid acceleration krävs än mer effekt. Ett krav från DSB var att sträckan Köpenhamn - Korsör skulle klaras på endast tiden 1:02, inklusive sex stycken uppehåll. Detta uppskattades kräva en effekt på 3,6 MW. (källa: "EA 3000 - Entwicklung und Bau elektrischer Lokomotiven für die Dänischen Staatsbahnen").

Vad gäller godståg varierar startmotståndet beroende på vagnstyp. Ofta kan avsevärda krafter behövas för att dra igång ett stillastående godståg, eftersom smörjoljan i lagren efter en längre tids stillastående kan ha runnit undan, det vill säga metall ligger dikt an mot metall. En tysk benämning för detta fenomen är "Lossbrytningsmotstånd" (Losbrechwiderstand). Detta belopp kan vara uppemot 300 N/t vid t ex snäva kurvor, men ett mer "normalt" värde vid "medelsvåra spår" är 150 N/t. Loket skulle då behöva en max startdragkraft på **300 kN** för att dra loss ett godståg med vikten 2.000 ton (källa: "Elektrische Triebfahrzeuge", 1973, sid 41-42).

En ny generation västtyska höghastighetslokomotiv

Tidigare nämndes att utvecklingen av DE 2500-lokomotivets boggier i hög grad påverkats av det västtyska ellokomotivet E103. E103-lokomotivet levererades dels i en prototypomgång (4 st 103.0, leveransstart 1965) och dels i en serieleverans (145 stycken 103.1, leveransstart 1971). De vinröd-beiga lokomotiven med sin aerodynamiska front - till stor del baserat på aerodynamisk forskning i det Tyska riket under 1930-talet - blev under 1970-talet en välkänd profil i västtysk massmedia.

Under mitten av 1970-talet började det stå klart, speciellt efter erfarenheterna av DE 2500, att ett fyraxligt, elektriskt lokomotiv med asynkromotorer för sth 160 km/h och med en topp effekt kring 5...6 MW, snart skulle vara möjligt. Samtidigt hade DB en stor flotta av nedslitna, fyraxliga ellok (E10). Dessa skulle inom en snar framtid behöva bytas ut.

Under 1977 beställde DB av en västtysk industrigrupp utveckling och tillverkning av fem stycken 120.0-lokomotiv. **Totalt kostade utvecklingen av dessa lokomotiv cirka 2,7 mrd kr** (prisnivå 2006). 120-lokomotivet skulle klara följande typer av tåg:

- * 5.400 ton malmtåg (två lokomotiv) i 80 km/h
- * 2.200 ton godståg i 80 km/h
- * 1.500 ton snabbgodståg (100 km/h)
- * 700 ton passagerartåg i 160 km/h



Fig 8 Ellokomotivet E120.1 (= serieversion). Lokomotivet är i praktiken "ett kombinerat TGV- och malmtågslokomotiv" (max 280 km/h). Serieversionen började att levereras under 1986.
Foto: Författaren, München

Skillnaden mot DE 2500 var flera. Då 120 är ett elektriskt lokomotiv ersattes det dieselelektriska kraftaggregatet (= dieselmotor + generator) av en stor transformator med en maximal effekt på hela 6 MVA och med vikten 11,2 ton. Vidare utökades effekten per hjulaxel från 375 kW till hela 1.400 kW. Något senare höjdes sth hos 120.0 till 200 km/h och en version växlades till och med för 280 km/h.

Den största utmaningen för ingenjörerna var lokomotivets strömriktare, det vill säga den enhet som skapade tre utgående faser med varierande spänning och frekvens, allt matat från lokets interna likspänningsbus på 2,8 kV.

120-lokomotivet har fyra stycken elektriska drivmotorer med följande data:

Beteckning	BQg 4843
Tillverkare	BBC
Max spänning	2.200 V
Max ström	600 A
Max effekt	1.400 kW
Max vridmoment	10,5 kNm
Vikt	2,38 ton

För att driva dessa motorer valdes fyra stycken strömriktare med följande data (per styck):

Beteckning	13 SG 01a
Ingångsspänning	2.800 V DC
Utgångsspänning	0...2.200 V (till motor)
Utgångsström	600 A (till motor)
Utgångsfrekvens	0...200 Hz (till motor)
Vikt	1,95 ton

Varje strömriktare inrymdes i ett skåp med måtten 155 x 110 x 210 cm (L x B x H).

Totalt utrustades lokomotivet med fyra stycken strömriktare, som placerades i mitten av maskinrummet, tillsammans med två andra skåp med reläer och kondensatorer (glättning av den likriktade spänningen från transformatorn). Under detta område hängdes den drygt 11 ton tunga, oljekylta transformatorn.

Det visade sig dock vara komplicerat att utveckla en mobil anläggning för reglering av asynkronmotorer i "mång- megawatt- klassen". Några av de problem som uppstod med elutrustningen var kraftiga störningar på banans signalsystem, överhetning av komponenter samt för höga spänningar (transienter).

Totalt krävde de fyra strömriktarmodulerna ett kyloljeflöde på inte mindre än 24 liter per sekund, där en värmeeffekt av uppemot 155 kW skulle ventileras bort i oljekylaren. Luftflödet genom oljekylaren var mer än 10 kubikmeter per sekund.

Tidigare nämndes att en sinusvåg för högeffektapplikationer skapas genom att många, smala staplar (via pulsbreddsmodulering, PWM) tillsammans bildar en trappstegsformad, sinusliknande våg. Varje sådan våg kräver dock i princip raka, vertikala staplar ty annars uppstår oönskade effektförluster. Men även om man lyckas skapa dessa fyrkantsvågor med mycket täta mellanrum så innehåller de branta ramperna i varje stapel högfrekventa övertoner, som sprider sig och yttrar sig som störningar på bland annat signalsystem. **Därför måste in- och utgångar till strömriktare filtreras noggrant** och hela apparaten måste kläs in med ett avskärmat, jordat skal för att hindra utstrålning. Även matningen från strömriktarna till drivmotorerna måste filtreras för att undvika kraftiga spänningsspikar (spikar kan skada motor-lindningarnas isolering) och övertoner (värmer drivmotorerna extra mycket).

Det första av fem 120.0-lokomotiv (prototyp) levererades maj 1979 till DB, det vill säga samma månad som Folketinget fattade beslut om att elektrifiera det danska järnvägsnätet. Samma år beställde DSB de första av totalt 37 stycken diesellokomotiv av typen ME från Västtyskland.

Under april 1982 valde så till slut DSB att beställa en ny generation fyraxliga, elektriska lokomotiv från en västtysk industrigrupp, nästan tre år efter Folketingets beslut om elektrifiering. Det nya lokomotivet benämndes EA och hade följande huvuddata:

Längd över stötytor	19.380 mm
Boggjavstånd	9.940 mm
Sth	160 (175) km/h
Axelarr	Bo-Bo
Vikt	80,0 t
Kontaktledningsspänning	25 kV/ 50 Hz
Max effekt vid räl	4.000 kW
Elmotor beteckning	BQg 4546

Tabell 4 Huvuddata ellokomotivet EA 3000

Men innan vi går in för att närmare studera de två viktigaste nyheterna i EA-lokomotivet är det viktigt att förstå vad som skiljer asynkronmotorn tekniskt sett från andra elmotorer.

Asynkronmotorn

Det finns i princip två typer av elmotorer för järnvägsdrift; växelströmsmotorer och likströmsmotorer. Av isoleringstekniska skäl utförs en elmotor (eller generator) sällan för högre spänningar än 5.000 volt.

För att en elmotor skall fungera krävs att någon form av växlande magnetfält skapas inne i motorn. En metod bygger på att rotorn, det vill säga den rörliga delen inne i elmotorn (den fasta delen kallas för stator), växelsvis matas med likström genom att borstar leder över ström.

Det stora problemet med borstar är att de slits och kräver underhåll. Men även borstarnas anliggningsytor i rotorn slits, speciellt om gnistbildning sker. Vid underhåll måste hela rotorn lyftas ur och borstarnas anliggningsyta bearbetas för att bli jämn.

Problemet är att drivmotorn i en motorboggi ofta är mycket svåråtkomlig. Möjligen finns en inspektionsslucka för borstarna i motorn, som kan nå underifrån via en smörjgrop. Men att lyfta ur motorn kräver att först hela lokkorgen (vikt cirka 40 ton) först måste lyftas loss så att motorboggin blir fri. Sedan måste i sin tur motorn lyftas ur så att rotorn kan demonteras. Det är därför önskvärt med långa intervall mellan motorunderhållstillfällena.

Hos asynkronmotorn finns också en rotor och en stator. Den stora skillnaden jämfört med övriga motorer är att asynkronmotorn saknar såväl borstar som kommutator. *Det är till och med så att rotorn är kortsluten.* Hur är nu detta möjligt?

Asynkronmotorn bygger på att tre fasförskjutna växelströmmar ("trefas") roterar inne i motorns stator (d v s lindningarna). Kraftiga magnetfält bildas (induceras) då som påverkar rotorn. Då det finns en viss skillnad mellan statorns och rotorns magnetfält, så kallad "slip", uppstår ett vridmoment. Detta "slip" finns oavsett om motorn arbetar som motor eller som generator, fast i omvänd ordning.

Asynkronmotorn, som är mycket enklare och robustare än andra elmotorer, är en av de äldsta motortyperna. Den har funnits sedan artonhundratalet och har i grunden inte utvecklats särskilt mycket. Just på grund av frånvaron av borstar och kommutator är i praktiken underhållsfri och används i den mest skiftande utrustning.

Asynkronmotorn hade dock en stor nackel; den kunde inte utan stora svårigheter användas i sammanhang där varvtalet måste kunna regleras steglöst. Det fanns därför i praktiken bara två lägen; stillastående eller full fart (det går även att koppla om polerna och på så vis variera varvalet ytterligare, stegvis). ***För att variera varvtalet steglöst måste växelströmmens frekvens kunna varieras.***

Trefas med variabel frekvens - men hur?

Det var fram till för bara några decennier sedan en omöjlig uppgift för ingenjörerna att ***på ett effektivt sätt*** framställa en högeffekts växelström med steglöst varierbar frekvens. Om kraven på effektivitet är låga är det dock enkelt att framställa en varierbar växelström, så sker t ex i en vanlig förstärkare i en ljudanläggning när växelström med varierbar frekvens för högtalarna genereras. Nackdelen med denna metod är dock att större delen av energin går bort i form av värme. Detta är inte praktiskt möjligt i högeffektsapplikationer, t ex i ett lokomotiv.

Ett effektivt sätt att skapa en växelström är s k pulsbreddsmodulering (PWM). Principen går ut på att dela upp likström mycket snabbt i varierande intervall. Varje intervall har en pulsbredd mellan 0 och 100%. Vid 0% pulsbredd blir spänningen maximalt negativ, vid 50% är den 0 volt och vid 100% är den maximalt positiv. Med en sådan styrkrets kan såväl spänning som frekvens varieras oberoende av varandra.

Den främsta svårigheten fram till sextiotalet var att ***kombinera just mycket snabba till- och frånslag i en extremt snabb elektrisk strömbrytare ("switch") som kunde hantera mycket höga effekter.*** Vid långa till- och frånslagstider blir nämligen effektförlusterna oacceptabelt stora. Under mitten av 1960- talet blev dock snabba till- och frånslagningstider möjligt genom snabba s k tyristorer. Genom att parallellkoppla tre stycken s k halvbruggor (å två stycken "switchar") kunde för första gången en växelström för mycket höga strömstyrkor skapas. Ett av företagen som var mycket tidigt ute med den nya trefastekniken, baserad på tyristorer, var den schweiziska koncernen BBC (senare ABB).

EA

Tidigare nämndes att det nya, danska EA-lokomotivet till stor del baserade sig på det västtyska 120-lokomotivet (se fig 8). Men det fanns även skillnader; den högre kontaktledningsfrekvensen (50 Hz istället för 16 2/3 Hz) samt den lägre effekten (4,0 MW istället för 4,4 MW) gjorde att transformatorn hos EA-lokomotivet kunde göras något lättare. Hos EA-lokomotivet väger transformatorn (typ LOT 5500) endast 8,5 ton medan 120-lokomotivets (typ TLFB 6301) väger 11,2 ton. Därför behövde inte lika stora ansträngningar göras för att reducera lokkorgens vikt hos EA-lokomotivet.

Inredningen i EA-lokomotivets maskinrum påminner om 120-lokomotivets. Längs en tolv meter lång mittgång står utrustningen prydligt placerad längs vardera sidan i eleganta kabinett, nästan som inne i en datorhall eller i ett modernt ställverk.

Mitt under maskinrummets gång hänger den drygt 8 ton tunga, oljekyllda transformatorn. Den matas konstant på primärsidan av *en* högspänningsledning med spänningen 25 kV och frekvensen 50 Hz. På sekundärsidan finns *sju* utgångar, varav fyra stycken går till motorernas växelriktare (varje 1.316 volt).

För olika typer av ventilation finns sex stycken större genomföringar i golvet; fyra stycken för de elektriska drivmotorerna och två stycken för kyloljefläktarna. Kyluften till motorerna sugas in genom sidan på taket (mindre mängd snö från plattform och bromsdamm från blockbromsar). Känslig elektronik har dock placerats inne i förarutrymmena.

En stor skillnad mellan 120-lokomotivet och EA är boggierna. Det förra lokomotivet använder en tämligen konventionell boggi med totalvikten 16,0 ton. Dock har stort arbete lagts ner för att reducera 120-lokomotivets boggi-ramvikt, som endast uppgår till 1,78 ton.

Boggin hos EA-loket har, liksom 120-lokomotivet, samma hjul diameter (125 cm) och axelavstånd. Däremot väger boggin cirka 415 kg mindre, per styck räknat. Men då skall man komma ihåg att 120-lokomotivets maximala dragkraft är hela 31 % högre.

Priset för EA-lokomotivet

En viktig fråga är kostnaderna för det nya EA-lokomotivet i förhållande till konkurrenterna. Tidigare nämndes att dess kontinuerliga topp effekt är 4,0 MW och topphastighet 175 km/h. När EA-lokomotivet första gången beställdes april 1982 fanns dock redan 120.0-lokomotivet, fast med en kontinuerlig topp effekt på 4,4 MW och en topphastighet av 200 km/h. EA-lokomotivet beställdes dessutom i endast totalt 22 exemplar medan 120.1-lokomotivet beställdes i 60 stycken exemplar (samt 5 stycken prototyper).

Det är ofta svårt att jämföra priser, speciellt då olika faktorer påverkar slutpriset (ev moms, utvecklingskostnader, reservdelar, leveranstid, licenstillverkning, utbildning etc). Men prislappen var följande (prisnivå 2006):

- * EA : 53 mkr
- * 120.1 : 42 mkr

Av effekt- och topphastighets- data, kombinerat med priserna, borde i DSB:s upphandling 120-lokomotivet ha varit vinnaren då dess topphastighet var 14% högre, effekten 10% högre och priset 21% lägre.

Den fortsatta utvecklingen

Det har under perioden 1975...1998 skett en dramatisk förändring av DSB's fordonsflotta. Under 1975 fanns 1.215 stycken personvagnar samt 289 stycken diesellok hos DSB. Under 1998 hade siffrorna sjunkit till endast 287 personvagnar och 95 stycken diesellokomotiv.

Under 1984, ungefär samtidigt som de första EA-lokomotiven började att provköras, träffades ett beslut inom DSB att satsa på en ny generation dieseldrivna motorvagnståg för fjärrtrafik. 1998 fanns det 93 stycken sådana IC3-tågsätt och senare beställdes ytterligare 83 stycken dieseldrivna tågsätt av typen IC4, den senare serie för ett totalt belopp av 6,18 miljarder kronor (prisnivå 2006). Dessutom fanns vid samma tidpunkt 44 stycken elektriska ER- motorvagnssätt. Således totalt 176 stycken nya dieselmotorvagnssätt för topphastigheter kring 180...200 km/h.

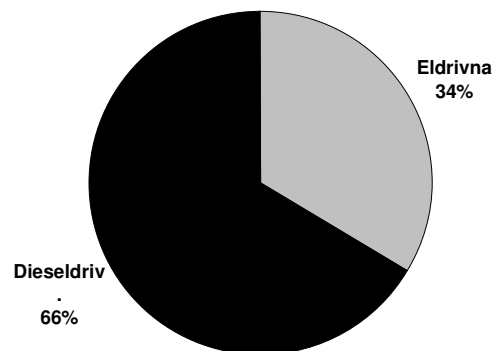


Fig 9 Fördelningen av sittplatser mellan dieseldrivna och eldrivna fjärr- och regionaltåg hos DSB under 2006. Totalt var antalet säten ungefär 70.000 stycken.
Källa: Statistisk årsbok, 2007

Sammanfattning

Efter det att huvudlinjen Helsingör - Köpenhamn- Padborg (38 mil) under 1997 blev färdigelektrifierad så stannade det fortsatta elektrifieringsarbetet av. Under 2003 stoppade Folketinget definitivt fortsatt elektrifiering "...fordi det var för dyrt i forhold til miljøgevinsten...", samtidigt som leveransstarten av 83 stycken dieseldrivna motorvagnståg (IC 4) för 200 km/h närmade sig. Redan fanns en flotta av 93 stycken dieseldrivna IC 3:or för 180 km/h och ett antal eldrivna ER- motorvagnssätt. Däremot var antalet moderna, konventionella personvagnar för höga hastigheter litet samtidigt som EA- lokomotiven endast beställdes i totalt 22 exemplar. Flera av EA- lokomotiven har senare sålts till Centraleuropa och det är tveksamt om så få EA- lokomotiv i längden kan vara lönsamma att ha kvar. Om resterande EA-lok skrotas och/eller säljs ut så återstår inom området el-lokomotiv endast de nya elektriska godstågslokomotiven av typen EG (som inte är avsedda för persontåg).

I och med "elektrifieringsstoppet" skrinlades definitivt planerna på att elektrifiera banan norrut till Fredrikshavn. Den tidigare huvudbanan Köpenhamn - Helsingör (4,3 mil), som användes för de första proven med EA, är numera endast en bibana efter den nya Öresundsbron. ***Å andra sidan finns numera möjligheten att passera hela vägen genom Danmark på elektrifierade spår*** (dock till viss del enkelspår), vilket har gjorts lättare genom den nya generationen lokomotiv från Siemens (typ EG), som klarar såväl kontaktledningsspänningen 15 kV (Tyskland samt Sverige och Norge) som 25 kV (Danmark). Under 2002 började dessa sexaxliga tvåsystemlokomotiv att dra tunga godståg mellan de två huvudrangerbangårdarna i Hallsberg (Sverige) och Maschen (Tyskland).

Danmark står inför nya, stora omstruktureringar av sitt järnvägsnätet, men enligt många en oproportionellt stor del av uppmärksamheten numera riktas numera mot transit- trafiken och mot EU:s direktiv. Den Tyska statsjärnvägen (DB) ser dessutom gärna att godstågen åter börjar att rulla via Fehmarn-sundet och för att underlätta detta har ett beslut fattats om att bygga en ny kombinerad motorvägs- och järnvägsbro över sundet. Det innebär för Danmarks räkning att linjen Ringsted - Rødby färjeläge (12 mil) måste elektrifieras och, senare, även byggas ut med dubbelspår. Ovanpå detta ställs krav om en ny fast förbindelse mellan Helsingör och Helsingborg, vilket åter skulle belasta regionaltåglinjen Köpenhamn- Helsingör, som går genom känslig bostadsbebyggelse längs den vackra östkusten.

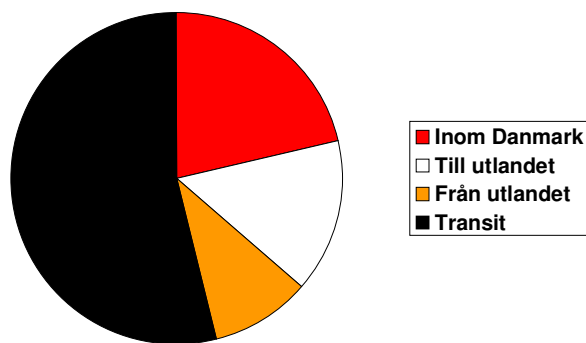


Fig 10 Fördelningen av den spårburna godstrafiken i Danmark. Totalt uppgick den till 198 miljoner tonmil 2005.
Källa: Statistisk årsbok

Frågan som återstår är hur DSB som helhet kommer att omgestaltas. De stora inköpen av dieseldrivna motorvagnståg (IC 3 och IC 4) är tydliga tecken som visar den danska inriktningen på den framtida trafikeringen, men å andra sidan har de danska persontågen en medioker marknadsandel på endast 6 % och motsvarande siffra för godstrafiken är endast 8 %. Med tanke på klimathotet skulle en ökad satsning på den nationella regional- och fjärrtågtrafiken - kombinerat med en ökad användning eldrivna spårfordon - minska belastningen på miljön.

En viktig fråga är hur EU:s nya Unions-snabbtågssystem (TEN) kommer att påverka det danska järnvägsnätet. I Sverige är diskussionen om "snabbtåg till EU" högt uppskruvad och risken med sådan fanatism är att sakligheten hamnar i skymundan.

TEE visar vägen?

Under 1957 bildades av flera västeuropeiska länder, däribland Schweiz, ett exklusivt fjärrtågssystem med beteckningen TEE (Trans Europ Express). TEE-tågen var beige/vinröda och präglades av lyx (endast första klass fanns), hög topphastighet och snabba gränspassager. Vissa lokomotiv klarade upp till fyra olika kontaktledningsspänningar. Ett motsvarande natt- trafik- koncept, benämnt TEN (fast då med betydelsen Trans Europ Night) lanserades och en gemensam sovvagnspool bildades. *Med tiden tog dock de nationella operatörerna över TEE-tågen och till slut lades TEE ner.* Det var därför ett tecken i tiden när Ulrik Winge från Banestyrelsen (2001) sade följande: *"Men det er jo ikke nødvendig at være hverken elektrisk eller at kunne køre 200 eller 250 km/h for at være europeisk..."* samt *"Man kan sådan set godt fjerne nogle af forpligtelserne, men det skal være i dialog med EU"*.

Winges uttalande som statens företrädare är intressant på flera sätt, bland annat då han vädjar till en mer balanserad hållning till utbyggnaden av det framtida järnvägsnätet och i dialog med utlandet. Kanske kan uttalandet åtminstone delvis tolkas som en reträtt från den tidigare tekniska fokuseringen inom järnvägen, till en mer öppen politik där ordet "dialog" är en av hörnstenarna!

Jämförelse data ellokomotiv EA 3000 och 120.0

Allmänt

Typ	EA 3000	120.0
Ägare	DSB	DB
Första tillverkningsår	1985	1979
Tillverkare mek del	Henschel Scandia Randers	=> Krupp Krauss Maffei
Tillverkare el del	Siemens BBC AEG	=> =>
Axelarr	Bo-Bo	=>
Vikt	80,0 t	84,0 t
Stax	20,0 t	21,0 t
Sth	160 (175) km/h	160 (200 km/h)

Kaross

Längd över stötytor	19.380 mm	19.200 mm
Boggiavstånd	9.940 mm	10.200 mm
Höjd över fälld strömvtagare	4.590 mm	4.375 mm
Korgbredd	3.150 mm	3.000 mm
Typ av koppel	skruvkoppel	=>
Mekanisk del vikt	39,7 t	36,7 t
Utvändig yta	sickad plåt	slät plåt

Boggier

Typ av boggi	tvåaxlig tvåmotors	=>
Axelavstånd	2.800 mm	=>
Hjuldiameter- nytt	1.250 mm	=>
Primärfjädring	spiralfjäder	=>
Sekundärfjädring	spiralfjäder	=>
Broms	blockbroms elbroms	=> =>
Boggivikt	15,55 t	15,96 t

Elutrustning

Kontaktledningsspänning	25 kV	15 kV
Kontaktledningsfrekvens	50 Hz	16 2/3 Hz
Kontinuerlig effekt	4.000 kW	4.400 kW
Effekt/ vikt	50,0 kW/t	52,4 kW/t
Drivmotorbeteckning	BQg 4546	BQg 4843
Tågvärmeeffekt	720 kW (1)	900 kW
Spänning hjälpkraft	440 V 60 Hz, 3~	440 V 60 Hz, 3~
Vikt elektrisk del	40,3 t	47,3 t

(1)= vid +12°C

Kronologi elektrifiering och fjärtrafik DSB, perioden 1970- 2007

1973	Oljekris
1974	* IC-trafiken mellan Själland och Jylland sker med loktåg * Arne Bondesen medarbetare i elektrifieringsprojektet
1978	Rapport offentliggörs som föreslår elektrifiering
1979, maj	Lag no 206 "at gennemføre de fornødene foranstaltninger til indførelse av elektrisk drift..."
1979	* Elektrifieringen av DSB's fjärrtågsnät startar * Eigil Koop chef för DSB's elektrifieringskontor

1980	* Nytt IC-färjesystem över Stora Bält * Arne Bondesen ledare projektet "Elektrische Traktion"
1981	Första ME- loket anländer till DSB
1982, april	Order EA-lokomotiv till BBC i Mannheim (totalt 2 st EA-lok)
1983, mar	Order 8 stycken EA-lokomotiv
1983	En rapport visar att motorvagnståg (IC 3) kunde minska restiderna mellan Jylland och Själland
1984, aug	Kontaktledningen på sträckan Helsingör- Rungsted spännings-sätts
1984, sep	Det första EA-loket anländer till DSB
1984, 18 sep	Visning av EA-lokomotivet för allmänheten i Köpenhamn
1985	* Eigil Koop slutar vara chef för DSB's elektrifieringskontor * Sista ME- loket levereras till DSB
1985, 23 maj	EA- loket inkopplat i ett tågsätt med 1 st ME-lok samt 2 st personvagnar
1985, 4 dec	Första eltåget Köpenhamn- Helsingör (2 st EA-lok, 3 st ME-lok samt 1 st mätvagn)
1986	Niels T Nielsen chef för Fordonsutvecklingsavdelningen vid DSB
1988	"Plan 2000" lanseras
1989, 18 juni	Det första IC 3 levereras till DSB

1990	IC 3 sätts i trafik
1990, 30 juni	Kontrakt mellan DSB och ABB för 17 st elektriska motorvagnståg ER
1990, 11 dec	Kontrakt modifiering IC 3 för samkörning med ER
1993	Vissa fjärrtåg till Tyskland sker med IC 3 (via Rödby- Puttgarden)
1993, sommar	Leveranserna av motorvagnståget ER skulle ha startat
1995	Start leverans elektriska ER tågsätt till DSB
1997	* Elektrifieringen av järnvägen når Sönderborg * Samtliga danska huvudlinjer skulle ha varit färdigelektrifierade för en kostnad av 8,7 mrd skr * DSB beställer 13 stycken elektriska, sexaxliga godstågs-lokomotiv
1997, 1 jun	Den fasta Stora Bält- förbindelsen öppnas för järnvägstrafik. Järnvägens kostnadsandel för investeringarna är 20 miljarder SEK (Prinsnivå 2006)
1998	* Sista leverans av IC 3 till DSB * Sista leverans av ER till DSB
1999, 26 nov	Ett politiskt trafikavtal "indeholder ikke elektrificering"

2000	* DSB beställer 83 stycken dieseldrivna tågsätt av typen IC 4 för 6,8 miljarder SEK * Öresundsförbindelsen invigs
2001	Vid en hearing i Folketinget "droppas" tanken "om en fuldt ud elektrificeret jernbane"
2001, 1 jan	98% av enheten DSB Gods säljs till den Tyska riksjärnvägen (DSB behåller 2%)
2006, juni	Trafikstyrelsen hävdar att "...jernbanen i Danmark har kostet 700 millioner kroner mere end tilsvarende anlaeg i andre europaeiske lande..."
2006, okt	"Banens elektrificering er lagt død"
2007, juni	Överenskommelse mellan Danmark och Tyskland om en kombinerad väg-/järnvägsbro över Fehmarn-sundet
2007, nov	"En elektrificering af det resterende banenetet bør undersøges" , föreslår transport- och energiministern Jakob Axel Nielsen

(1)= Planerad elektrifiering DSB 25 kV (sammanställning av författaren), 2001

Delsträcka	Status idag	Tot spårlängd [mil]	Tot invest [mkr]	Specifik invest [SEK/spårmeter]
Fredericia- Århus	dubbelspår	21,7 mil	1.252...1.498	5.766...6.907
Århus- Ålborg	dubbelspår	27,98	1.553...1.855	5.555...6.634
Ålborg- Fredrikshamn	enkelspår	8,49	474...537	5.580...6.324
Lunderskov- Esbjerg	dubbelspår	11,14	537...603	4.824...5.406
Roskilde- Kalundborg	enkelspår	7,93	511...596	6.448...7.514
Ringsted - Vordingborg	dubbelspår	10,84	956...1.116	8.816...10.292
Vordingborg - Rødby	enkelspår	6,51	956...1.044	14.682...16.031
Totalt	---	<u>94,6</u>	<u>5.283...6.205</u>	<u>5.580...6.560</u>

Beräkningsförutsättningar

Prisnivå	2006 (inflationskompenserat från 2001, index 1,096)
Delsträckor	"Høring om elektrificeringsprojektet", Folketingets Trafikudvalg, 19 okt 2001, Tabell 2
Status idag	"Antal spor pr. strækning", Banedanmark 2007
Tot spårlängd	TIB (Tjenestekøreplanens Indledende Bemærkninger, indeholder oplysninger om de enkelte strækningers kilometrering, højst tilladte hastigheder samt signaludstyr)